

УДК 621:787

А. М. Довгалев, Н. А. Леванович, С. А. Сухоцкий, И. А. Тарадейко

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ НАРУЖНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩЕНИЯ**

UDC 621:787

A. M. Dovgalev, N. A. Levanovich, S. A. Sukhotsky, I. A. Taradeiko

**MATHEMATICAL MODELING OF THE MAGNETIC-DYNAMIC
STRENGTHENING OF THE EXTERNAL SURFACE OF REVOLUTION**

Аннотация

Выполнено математическое моделирование процесса магнитно-динамического упрочнения поверхности вала, при котором обеспечивается комбинированное энергетическое воздействие на зону обработки деформирующими шарами и магнитным полем. Приведены аналитические зависимости для определения кинестатических характеристик деформирующего шара в момент его соприкосновения с упрочняемой поверхностью вала.

Ключевые слова:

упрочнение, пластическое деформирование, ферромагнитная деталь, деформирующие шары, техническая система, поверхностный слой, поверхность вращения, магнитный привод, кольцевая камера, магнитное поле.

Abstract

The paper presents the performed mathematical modeling of the magnetic-dynamic strengthening of a shaft surface, which provides the combined energy action on the zone treated by deforming balls and magnetic field. The analytical dependences are found for determining kinetostatic characteristics of the deforming ball at the moment of its contact with the shaft surface being strengthened.

Key words:

strengthening, plastic deformation, ferromagnetic workpiece, deforming balls, engineering system, surface layer, surface of revolution, magnetic drive, annular space, magnetic field.

Введение

Долговечность деталей технических систем определяется состоянием их поверхностного слоя, непосредственно участвующего в работе и формируемого на финишных операциях технологического процесса [1–3].

Перспективным направлением повышения долговечности деталей является применение механических и физико-технических методов обработки, позволяющих сформировать модифицированный поверхностный слой с высокими эксплуатационными характери-

ками [4–7].

Наиболее эффективными для повышения эксплуатационных свойств поверхностей деталей являются методы поверхностного пластического деформирования [8–11].

Большой научно-практический интерес представляет метод магнитно-динамического упрочнения поверхностей деталей технических систем деформирующими шарами, имеющими электромагнитный или магнитный привод [12–18].

Разработаны конструкции инструментов для осуществления магнитно-динамического упрочнения плоскостей и внутренних поверхностей вращения [18–22]. На начальной стадии находятся работы по созданию инструментов для упрочняющей обработки наружных поверхностей вращения.

Объект исследований

Отделочно-упрочняющую обработку наружной поверхности вращения осуществляют инструментом, представленным на рис. 1.

Инструмент содержит диски 1, 2 с центральным отверстием 3, образующие сообщающиеся кольцевые камеры 4, 5. В кольцевой камере 4 установлены деформирующие шары 6, а в кольцевой камере 5 – шары-отражатели 7. Инструмент снабжен устройством намагничивания поверхности ферромагнитного вала 8, выполненным в виде двух колец 9, 10, цилиндрических постоянных магнитов 11 и цилиндрических магнитопроводов 12.

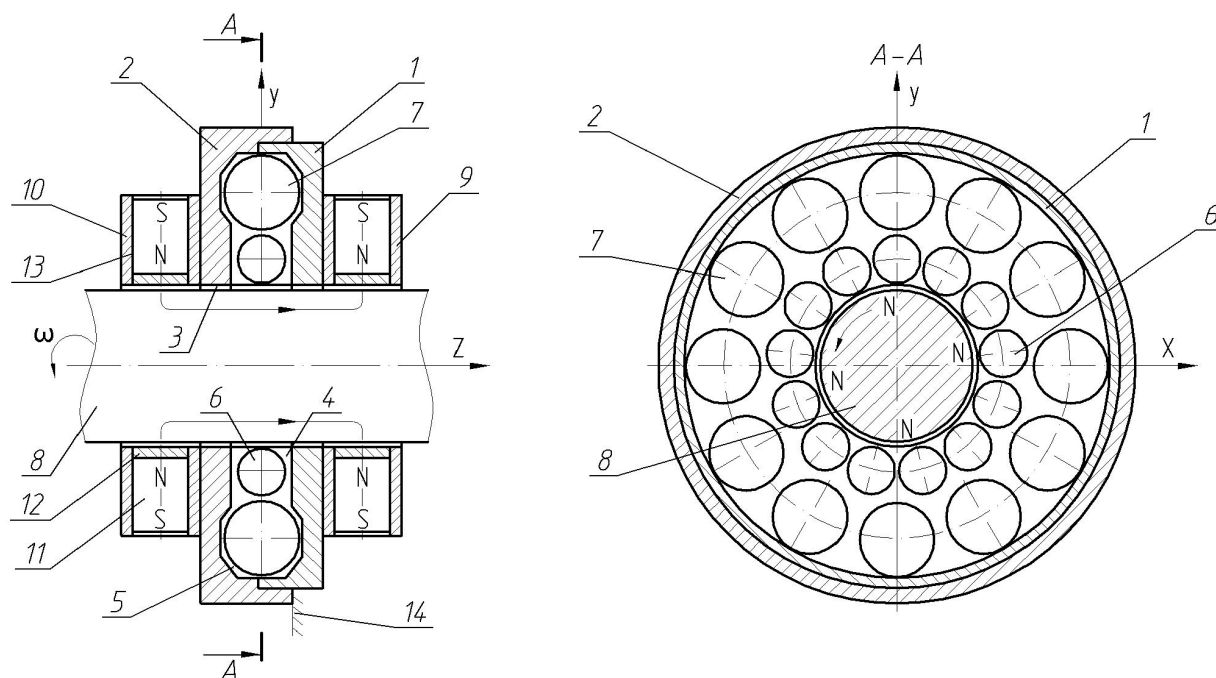


Рис. 1. Схема магнитно-динамического упрочнения наружной поверхности вращения

В кольцах 9, 10 изготовлены с равномерным угловым шагом радиальные отверстия 13. Цилиндрические магнитопроводы 12 запрессованы в радиальных отверстиях 13 и выполнены заподлицо с поверхностью центрального отверстия 3. Цилиндрические постоянные магниты 11 установлены в радиальных отверстиях 13 с одинаковым расположением полюсов N, S и взаимодействуют с торцами магнитопрово-

дов 12. Кольца 9, 10 имеют одинаковое угловое расположение радиальных отверстий 13 и закреплены соосно на дисках 1, 2.

Упрочняющую обработку осуществляют следующим образом. Инструмент закрепляют в резцедержателе 14 станка. Вал 8 вводят в центральное отверстие 3 и устанавливают в центрах станка с возможностью передачи вращающегося момента. Магнитные сило-

вые линии от цилиндрических постоянных магнитов 13 через цилиндрические магнитопроводы 12 замыкаются на поверхностный слой ферромагнитной детали. В результате участок вала, расположенный между кольцами 9, 10, намагничивается и притягивает к себе деформирующие шары 6. Валу 8 сообщают вращение, а инструменту – движение подачи. Намагниченный вращающийся участок вала 8 воздействует магнитным полем на деформирующие шары 6 и разгоняет их в окружном направлении кольцевой камеры 4. Под действием центробежной силы деформирующие шары 6 расходятся в радиальном направлении. Сталкиваясь с шарми-отражателями 7, деформирующие шары 6 изменяют направление своего движения и осуществляют упрочнение поверхности вала. При этом в зоне деформирования одновременно действуют магнитное поле и динамическая сила от деформирующих шаров 6, что повышает эффективность процесса поверхностного пластического деформирования. На поверхности вала 8 формируется новый микрорельеф с низкой шероховатостью и профилем, представляющим собой пересечение отпечатков от деформирующих шаров 6, имеющих высокие эксплуатационные свойства.

Таким образом, процесс магнитно-динамического упрочнения реализуется механической системой, в состав которой входят: устройство намагничивания поверхностного слоя ферромагнитной детали; вращающийся намагниченный вал; деформирующие шары и шары-отражатели, установленные в кольцевых камерах инструмента с возможностью взаимодействия.

Постановка задачи исследования

В настоящее время отсутствуют теоретические основы кинематики и динамики фаз движения деформирующих шаров, в том числе при их периодическом взаимодействии с шарми-отражателями и с упрочняемой поверх-

ностью вала. Это вызывает затруднение при назначении режимов упрочняющей обработки и выборе конструктивных параметров инструмента для магнитно-динамического упрочнения наружных поверхностей вращения. Таким образом, работа посвящена решению поставленной задачи.

Основная часть

Выполним математическое моделирование рассматриваемой механической системы. При разработке математической модели введем следующие допущения: продольная ось инструмента располагается горизонтально; рассматриваем движение одного деформирующего шара, т. к. все деформирующие шары инструмента находятся в одинаковых условиях; исследуем относительное движение деформирующего шара в плоскости, перпендикулярной продольной оси инструмента в подвижной системе координат; деформирующий шар и шар-отражатель рассматриваем как материальные точки с массами, помещенными в центр сфер соответствующих радиусов; магнитное взаимодействие между деформирующими шарами инструмента отсутствует; сила магнитного притяжения деформирующего шара к намагниченной детали направлена по линии, соединяющей их геометрические центры; источники магнитного поля инструмента расположены с равномерным угловым шагом; на поверхности ферромагнитного вала источники магнитного поля инструмента создают однородное магнитное поле.

Моделирование движения деформирующего шара от намагниченной детали до шара-отражателя. Рассмотрим движение деформирующего шара относительно подвижных осей координат Ox_1y_1 , связанных с центром масс деформирующего шара (система координат Ox_2y_2 связана с центром масс детали) (рис. 2, а).

При отрыве деформирующего шара 1 от намагниченной детали 2 оси ко-

ординат Ox_1y_1 смещаются от системы координат Ox_2y_2 на относительный скользящий

угол φ^T (рис. 2, б).

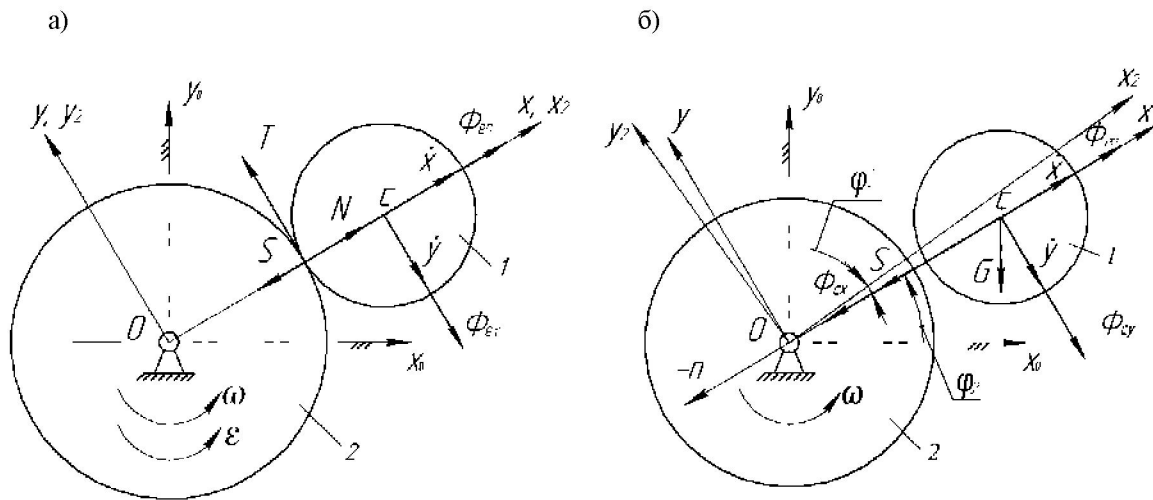


Рис. 2. Схема движения деформирующего шара: а – в момент отрыва от намагниченной детали; б – после отрыва от детали и перемещения к шару-отражателю; 1 – деформирующий шар инструмента; 2 – поперечное сечение намагниченного вращающегося вала

Запишем основное уравнение динамики относительного движения деформирующего шара:

$$m_1 \vec{a}_T = \vec{G} + \vec{N} + \vec{T} + \vec{\Phi}_{en} + \vec{\Phi}_{et} + \vec{\Phi}_c + \vec{S}, \quad (1)$$

где m_1 – масса деформирующего шара; \vec{a}_T – относительное ускорение центра масс деформирующего шара; \vec{G} – сила тяжести деформирующего шара; \vec{N} и \vec{T} – нормальная и касательная составляющие силы взаимодействия деформирующего шара с поверхностью намагниченной детали (в момент отрыва деформирующего шара от поверхности детали указанные силы равны нулю); $\vec{\Phi}_{en}$ – нормальная составляющая переносной силы инерции; $\vec{\Phi}_{et}$ – касательная составляющая переносной силы инерции (при установившемся режиме $\vec{\omega} = \text{const}$ $\vec{\Phi}_{et} = 0$); $\vec{\Phi}_c$ – кориолисова сила инерции; \vec{S} – сила магнитного притяжения деформирующего шара к поверхности намагниченной детали.

Силой \vec{G} пренебрегаем, т. к. она

значительно меньше действующих сил.

Рассмотрим силы Φ_{en} и Φ_{et} , входящие в уравнение (1):

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

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

где ω – угловая скорость вращения намагниченной детали; r_n – начальное расстояние между геометрическими центрами детали и деформирующего шара, $r_n = r_1 + r_2$; r_1 , r_2 – радиусы деформирующего шара и упрочняемой детали соответственно.

Значение кориолисовой силы инерции $\vec{\Phi}_c$ в проекциях на оси x , y :

$$\Phi_{cx} = -2m_1 \omega \dot{y}; \quad (4)$$

$$\Phi_{cy} = -2m_1 \omega \dot{x}. \quad (5)$$

Сила магнитного притяжения деформирующего шара S в момент его отрыва от поверхности намагниченной детали равна Φ_{en} и определяется выражением

$$S = m_1 \omega_1^2 (r_1 + r_2), \quad (6)$$

где ω_1 – угловая скорость вращения детали в момент отрыва деформирующего шара от намагниченной поверхности.

С некоторым допущением считаем, что в пределах движения деформирующего шара между деталью и шаром-отражателем сила магнитного притяжения $S = \text{const}$.

Запишем уравнение (1) в проекциях на подвижные оси x, y :

$$m_1 \ddot{x} = -\Phi_{cx} - S + \Phi_{en}; \quad (7)$$

$$m_1 \ddot{y} = -\Phi_{cy}. \quad (8)$$

После подстановки значений сил и преобразований уравнения (7) и (8) имеют вид:

$$\ddot{x} = -2\omega \dot{y} - \omega_1^2 r_H + \omega^2 x; \quad (9)$$

$$\ddot{y} = -2\omega \dot{x}. \quad (10)$$

Проинтегрируем уравнение (10). Тогда проекция скорости на ось Oy

$$\int_0^y \dot{y} dy = -2\omega \int_{r_H}^x dx; \quad (11)$$

$$\dot{y} = 2\omega(r_H - x). \quad (12)$$

Подставив выражение (12) в уравнение (9), получим неоднородное дифференциальное уравнение

$$\ddot{x} - 5\omega^2 x = r_H(-4\omega^2 - \omega_1^2). \quad (13)$$

Проинтегрируем уравнение (13). Тогда проекция скорости на ось Ox

$$\frac{dx}{dx} \frac{d\dot{x}}{dt} = 5\omega^2 x + A;$$

$$\int_0^{\dot{x}} \dot{x} d\dot{x} = \int_{r_H}^x (5\omega^2 x + A) dx;$$

$$\dot{x} = \sqrt{5\omega^2(x^2 - r_H^2) + 2A(x - r_H)}, \quad (14)$$

где $A = r_H(-4\omega^2 - \omega_1^2)$.

Моделирование взаимодействия деформирующего шара с шаром-отражателем. Вращаясь с угловой скоростью ω вдоль кольцевой камеры инструмента, деформирующий шар 1 периодически взаимодействует с шаром-отражателем 3. При этом имеет место центральный удар (импульсы силы направлены по линии, соединяющей геометрические центры взаимодействующих шаров), а в зоне взаимодействия ударным трением пренебрегаем.

Для исследования ударного взаимодействия деформирующего шара с шаром-отражателем (рис. 3) коэффициент восстановления при ударе [23]

$$K = \frac{\text{tg}\alpha_1}{\text{tg}\alpha_2}, \quad (15)$$

где α_1 – угол падения деформирующего шара ($\vec{v}_{c1} \wedge -\vec{n}$); \vec{v}_{c1} – вектор относительной скорости центра масс деформирующего шара в момент начала удара; \vec{n} – единичный вектор нормали, проведенный от центра поверхности шара-отражателя к центру деформирующего шара; α_2 – угол отражения деформирующего шара ($\vec{u}_{c1} \wedge \vec{n}$); \vec{u}_{c1} – вектор относительной скорости центра масс деформирующего шара в момент окончания удара.

Согласно рис. 3 угол $\gamma_1 = \gamma - \pi/2$.

Из треугольника OC_0C следует, что наибольший угол

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

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

Для определения OC запишем равенство

$$OC_0 - r_3 + h = OC + r_1,$$

откуда

$$OC = OC_0 - r_1 - r_3 + h,$$

где r_3 – радиус шара-отражателя; h – натяг между деформирующим шаром и шаром-отражателем (величина перекрытия

вершин контактирующих шаров).

Подставив в уравнения (12) и (14) начальные условия в момент удара $x_k = OC$, получим проекции скорости центра масс деформирующего шара на оси Ox и Oy :

$$\dot{y}_k = 2\omega(r_H - OC); \quad (16)$$

$$\dot{x}_k = \sqrt{5\omega^2(OC^2 - r_H^2) + 2A(OC - r_H)}. \quad (17)$$

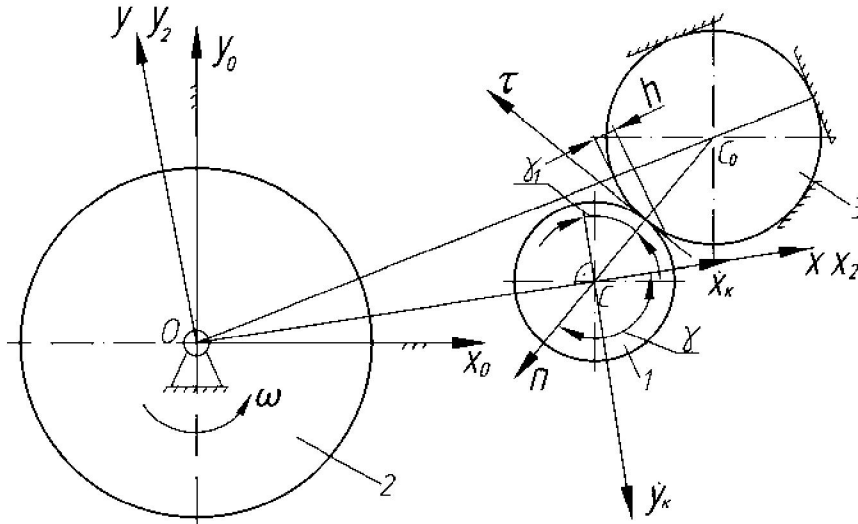


Рис. 3. Расчетная схема ударного взаимодействия деформирующего шара с шаром-отражателем: 1 – деформирующий шар инструмента; 2 – поперечное сечение намагниченного вращающегося вала; 3 – шар-отражатель

Запишем проекции скорости центра масс деформирующего шара на оси n и τ в момент удара деформирующего шара о шар-отражатель:

$$v_{1\tau} = -\dot{y}_k \sin \gamma_1 - \dot{x}_k \cos \gamma_1; \quad (18)$$

$$-v_{1n} = -\dot{y}_k \cos \gamma_1 + \dot{x}_k \sin \gamma_1. \quad (19)$$

Тогда угол падения и угол отражения деформирующего шара соответственно:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{v_{1\tau}}{v_{1n}} = \frac{-\dot{y}_k \sin \gamma_1 - \dot{x}_k \cos \gamma_1}{\dot{x}_k \sin \gamma_1 - \dot{y}_k \cos \gamma_1}; \quad (20)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{-\dot{y}_k \sin \gamma_1 - \dot{x}_k \cos \gamma_1}{\dot{x}_k \sin \gamma_1 - \dot{y}_k \cos \gamma_1} \cdot \frac{1}{K}. \quad (21)$$

Так как векторы ударного импульса направлены по общей нормали n к поверхностям соударяющихся шаров, то

проекция вектора относительной скорости центра масс деформирующего шара на касательную τ до и после удара остается неизменной:

$$v_{1\tau} = u_{1\tau},$$

где $v_{1\tau}$, $u_{1\tau}$ – проекции вектора относительной скорости центра масс деформирующего шара на касательную τ до и после удара соответственно.

Тогда

$$u_{1n} = \frac{u_{1\tau}}{\operatorname{tg} \alpha_2}. \quad (22)$$

Проекции скорости на оси Ox и Oy в момент окончания удара деформирующего шара о шар-отражатель:

$$v_{1x} = -u_{1n} \sin \gamma_1 - u_{1\tau} \cos \gamma_1; \quad (23)$$

$$v_{1y} = -u_{1n} \cos \gamma_1 - u_{1\tau} \sin \gamma_1. \quad (24)$$

Моделирование перемещения деформирующего шара к детали после его взаимодействия с шаром-отражателем. Запишем основное урав-

нение динамики относительного движения деформирующего шара (рис. 4):

$$m_1 \vec{a}_r = \vec{\Phi}_c + \vec{\Phi}_{en} + \vec{S}. \quad (25)$$

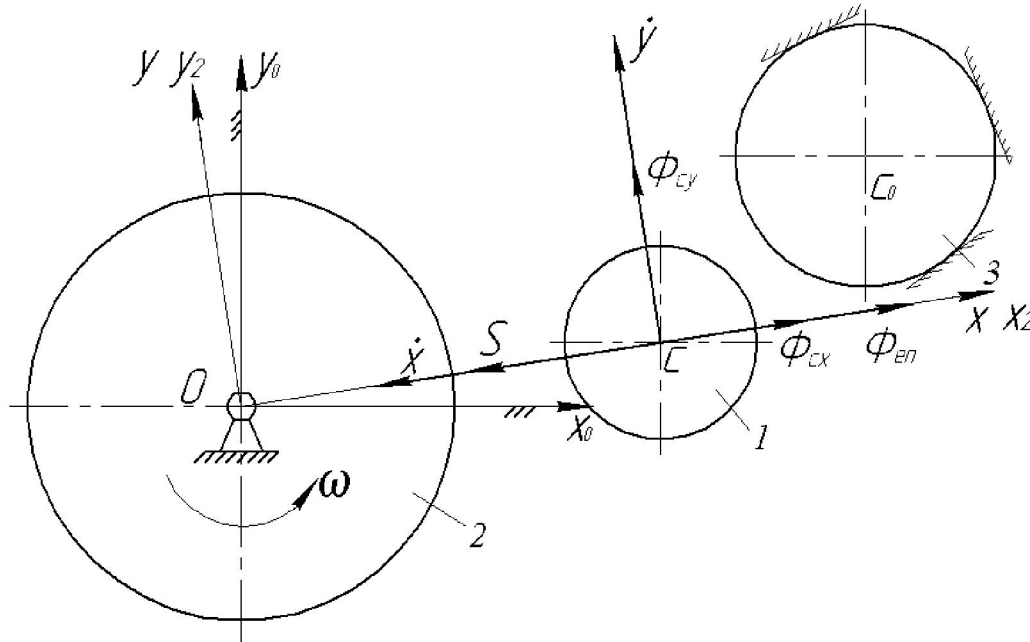


Рис. 4. Расчетная схема перемещения деформирующего шара к упрочняемой поверхности детали после его взаимодействия с шаром-отражателем: 1 – деформирующий шар; 2 – поперечное сечение намагниченного вращающегося вала; 3 – шар-отражатель

Составим проекции сил, входящих в уравнение (25), на оси x и y:

$$m_1 \ddot{x} = \Phi_{cx} - S + \Phi_{en}; \quad (26)$$

$$m_1 \ddot{y} = \Phi_{cy}. \quad (27)$$

Или

$$\ddot{x} = 2\omega \dot{y} - \omega_1^2 r_H + \omega^2 x; \quad (28)$$

$$\ddot{y} = 2\omega \dot{x}. \quad (29)$$

Проинтегрируем уравнение (29). Тогда проекция скорости на ось Oy:

$$\int_{v_{1y}}^{\dot{y}} dy = 2\omega \int_{OC}^x dx;$$

$$\dot{y} = v_{1y} + 2\omega(x - OC). \quad (30)$$

Подставив уравнение (30) в уравнение (28), получим неоднородное дифференциальное уравнение

$$\ddot{x} - 5\omega^2 x = 2\omega v_{1y} - 4\omega^2 OC - \omega_1^2 r_H. \quad (31)$$

Проинтегрируем уравнение (31). Тогда проекция скорости на ось Ox

$$\frac{dx}{dx} \frac{d\dot{x}}{dt} = 5\omega^2 x + B;$$

$$\int_{v_{1x}}^{\dot{x}} \dot{x} d\dot{x} = \int_{OC}^x (5\omega^2 x + B) dx;$$

$$\dot{x} = \sqrt{v_{1x}^2 + 5\omega^2(x^2 + OC^2) + 2B(x - OC)}, \quad (32)$$

где $B = 2\omega v_{1y} - 4\omega^2 OC - \omega_1^2 r_H$.

Подставив в уравнения (30) и (32) конечные условия $x = r_n$, получим проекции скорости на оси Ox и Oy в момент удара деформирующего шара о деталь:

$$\dot{y}_k = v_{1y} + 2\omega(r_n - OC); \quad (33)$$

$$\dot{x}_k = \sqrt{v_{1x}^2 + 5\omega^2(r_n^2 - OC^2) + 2B(r_n - OC)}. \quad (34)$$

Моделирование взаимодействия деформирующего шара с поверхностью вращающегося вала. Рассмотрим ударное взаимодействие деформирующего шара с поверхностью вращающегося вала (рис. 5).

В соответствии с теорией удара проекции скорости центра масс дефор-

мирующего шара на оси n и τ :

$$u_{1n} = k |\dot{x}_k|;$$

$$u_{1\tau} = v_{1\tau} = \dot{y}_k;$$

$$\operatorname{tg}\beta_2 = \frac{u_{1\tau}}{u_{1n}} = \frac{\dot{y}_k}{k\dot{x}_k}, \quad (35)$$

где β_2 – угол отражения деформирующего шара ($\vec{u}_{1c} \wedge \vec{n}$); \vec{u}_{1c} – вектор относительной скорости центра масс деформирующего шара в момент окончания удара; \vec{n} – единичный вектор нормали, проведенный к поверхности вращающегося вала.

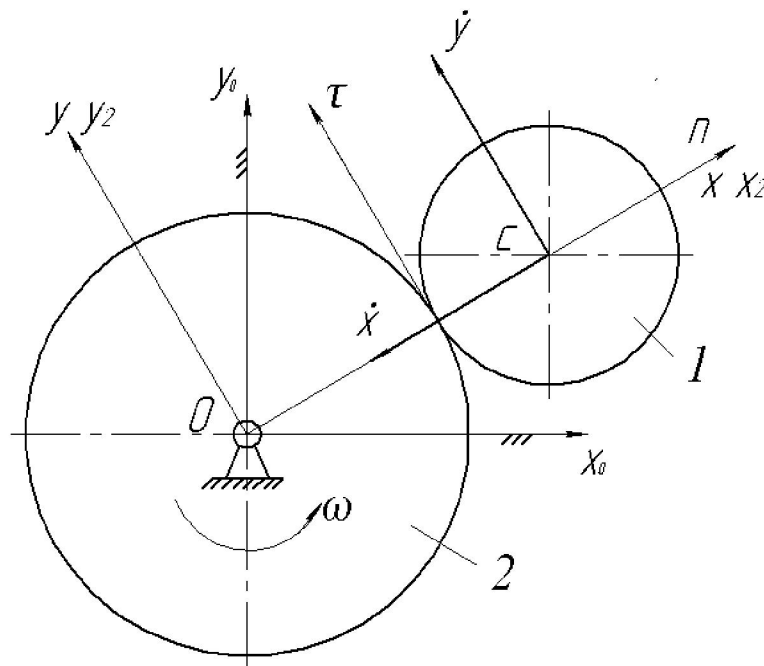


Рис. 5. Схема ударного взаимодействия деформирующего шара с поверхностью детали: 1 – деформирующий шар инструмента; 2 – поперечное сечение вращающегося вала

Окончательно получим начальные условия при отрыве деформирующего шара от детали и выходе его на рабочий режим упрочняющей обработки:

$$t_0 = 0; x_0 = r_1 + r_2 = r_n; y_0 = 0;$$

$$\dot{x}_0 = u_{1n} = k\dot{x}_k; \dot{y}_0 = u_{1\tau} = \dot{y}_k.$$

Заключение

В работе получены и решены системы дифференциальных уравнений, описывающих кинестатику фаз движения деформирующих шаров до выхода инструмента на установившийся режим упрочнения от поверхности намаг-

ниченной детали до шаров-отражателей; при взаимодействии с шарами-отражателями; при перемещении от шаров-отражателей к поверхности детали; при взаимодействии шара с упрочняемой поверхностью детали.

Получены аналитические зависимости для определения кинестатических характеристик деформирующего шара в момент его соприкосновения с упрочняемой поверхностью вала.

Результаты исследований являют-

ся основой для разработки системы автоматизированного проектирования технологии магнитно-динамического упрочнения наружных поверхностей вращения, позволяющей на стадии ее технологической подготовки назначать режимы упрочнения, выбирать рациональные конструктивные параметры инструмента и прогнозировать характеристики упрочнения поверхностного слоя детали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Смелянский, В. М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 300 с.
2. **Ящерицын, П. И.** Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков. – Минск : Наука и техника, 1986. – 215 с.
3. **Минаков, А. П.** Технологические основы пневмовибродинамической обработки нежестких деталей / А. П. Минаков, А. А. Бунос ; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Наука и техника, 1995. – 304 с.
4. **Сулима, А. М.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А. М. Сулима, В. А. Шулов, Ю. Д. Ягодкин. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
5. **Суслов, А. Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М. : Машиностроение, 1987. – 208 с.
6. **Рыжов, Э. В.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М. : Машиностроение, 1979. – 176 с.
7. **Бельгий, А. В.** Поверхностная упрочняющая обработка с применением концентрированных потоков энергии / А. В. Белый, Е. М. Макушок, И. Л. Поболь. – Минск : Наука и техника, 1990. – 179 с.
8. **Папшев, Д. Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. – М. : Машиностроение, 1978. – 152 с.
9. **Торбило, В. М.** Алмазное выглаживание / В. М. Торбило. – М. : Машиностроение, 1977. – 104 с.
10. **Жасимов, М. М.** Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании / М. М. Жасимов. – Алма-Ата : Наука, 1986. – 208 с.
11. **Шнейдер, Ю. Г.** Инструменты для чистовой обработки металлов давлением / Ю. Г. Шнейдер. – Л. : Машиностроение, 1971. – 248 с.
12. **Довгалец, А. М.** Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А. М. Довгалец, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 30–38.
13. Двухрядные магнитно-динамические инструменты / А. М. Довгалец [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2009. – № 2. – С. 12–20.
14. Инструменты для магнитно-динамического упрочнения поверхностей деталей машин / А. М. Довгалец [и др.] // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 94–97.
15. Магнитно-динамические инструменты для упрочнения наружных поверхностей вращения / А. М. Довгалец [и др.] // Вестн. БГСХА. – 2009. – № 4. – С. 174–178.
16. **Довгалец, А. М.** Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А. М. Довгалец, И. И. Маковецкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 26–30.
17. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалец [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 1. – С. 55–65.
18. **Пат. 2052331 РФ, МКИ 6 В 24 В 39/02.** Способ поверхностного пластического деформирования поверхности вращения и инструмент для его осуществления / А. М. Довгалец (РБ) ; заявитель и патентообладатель ММИ. – № 4854644/08 ; заявл. 27.07.90 ; опубл. 20.01.96, Бюл. № 2. – 6 с. : ил.
19. **Пат. 14287 РБ, МПК В 24 В 39/00.** Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалец [и др.] ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № a20081204 ; заявл. 23.09.08 ; опубл. 30.04.11. – 4 с.

20. Пат. 14651 РБ, МПК В 24 В 39/02. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоской поверхности / А. М. Довгалев, [и др.] ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20081196 ; заявл. 22.09.08 ; опубл. 30.08.11. – 4 с.

21. Пат. 15262, МПК В 24 В 39/06. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалев [и др.] ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20091368 ; заявл. 25.09.09 ; опубл. 30.12.11. – 4 с.

22. Пат. 15263, МПК В 24 В 39/06. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки плоских поверхностей / А. М. Довгалев [и др.] ; заявитель и патентообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № а20091407 ; заявл. 02.10.09 ; опубл. 30.12.11. – 4 с.

23. Лойцанский, Л. Г. Курс теоретической механики / Л. Г. Лойцанский, А. И. Лурье. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1983. – Т. 2. – 640 с.

Статья сдана в редакцию 15 октября 2013 года

Александр Михайлович Довгалев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-28-47-41. E-mail: ret@bru.by.

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

Сергей Александрович Сухоцкий, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-26-60-31.

Иван Анатольевич Тарадейко, студент, Белорусско-Российский университет.

Aleksandr Mikhailovich Dovgalev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-28-47-41. E-mail: ret@bru.by.

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

Sergey Aleksandrovich Sukhotsky, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-26-60-31.

Ivan Anatolyevich Taradeiko, student, Belarusian-Russian University.