

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_16

УДК 621:787

А. М. ДОВГАЛЕВ, канд. техн. наук, доц.

Д. М. СВИРЕПА, канд. техн. наук, доц.

М. В. ТАРАДЕЙКО

И. А. ТАРАДЕЙКО

Н. Ю. МАЛИНОВСКИЙ

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МОДИФИЦИРОВАНИЯ НАРУЖНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИМПУЛЬСНО-УДАРНЫМ НАКАТЫВАНИЕМ И ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Аннотация

Предложена математическая модель процесса модифицирования наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем. Получены аналитические зависимости, описывающие кинематические характеристики деформирующего шара в момент его движения от намагниченной детали до шара-отражателя.

Ключевые слова:

совмещенная обработка, поверхностное пластическое деформирование, магнитное поле, импульсно-ударное накатывание, математическое моделирование, модифицирование наружных цилиндрических поверхностей.

Для цитирования:

Математическое моделирование процесса модифицирования наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, М. В. Тарадейко, И. А. Тарадейко, Н. Ю. Малиновский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 16–25.

Введение

Получение модифицированного поверхностного слоя деталей машин является актуальной задачей для машиностроения. Известны методы магнитно-динамического раскатывания, а также магнитно-динамического и совмещенного накатывания поверхностей нежестких деталей. Выполнено математическое моделирование процессов упрочнения, осуществляемое указанными методами [1–4]. Однако данные методы не позволяют произвести обработку наружных цилиндрических поверхностей деталей инструментами обхватывающего типа, обладающими высокими показателями производительности. В связи с этим процесс модифици-

рования наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем вызывает повышенный научно-практический интерес. В его основе лежит импульсно-ударное воздействие деформирующих шаров на обрабатываемую деталь. Обработка поверхностей указанным способом позволяет интенсифицировать процесс упрочнения, а также обрабатывать детали машин из немагнитопроводных материалов.

Объект исследования

Для импульсно-ударного накатывания поверхности валов во вращающемся магнитном поле разработано устройство, представленное на рис. 1 [5, 6].

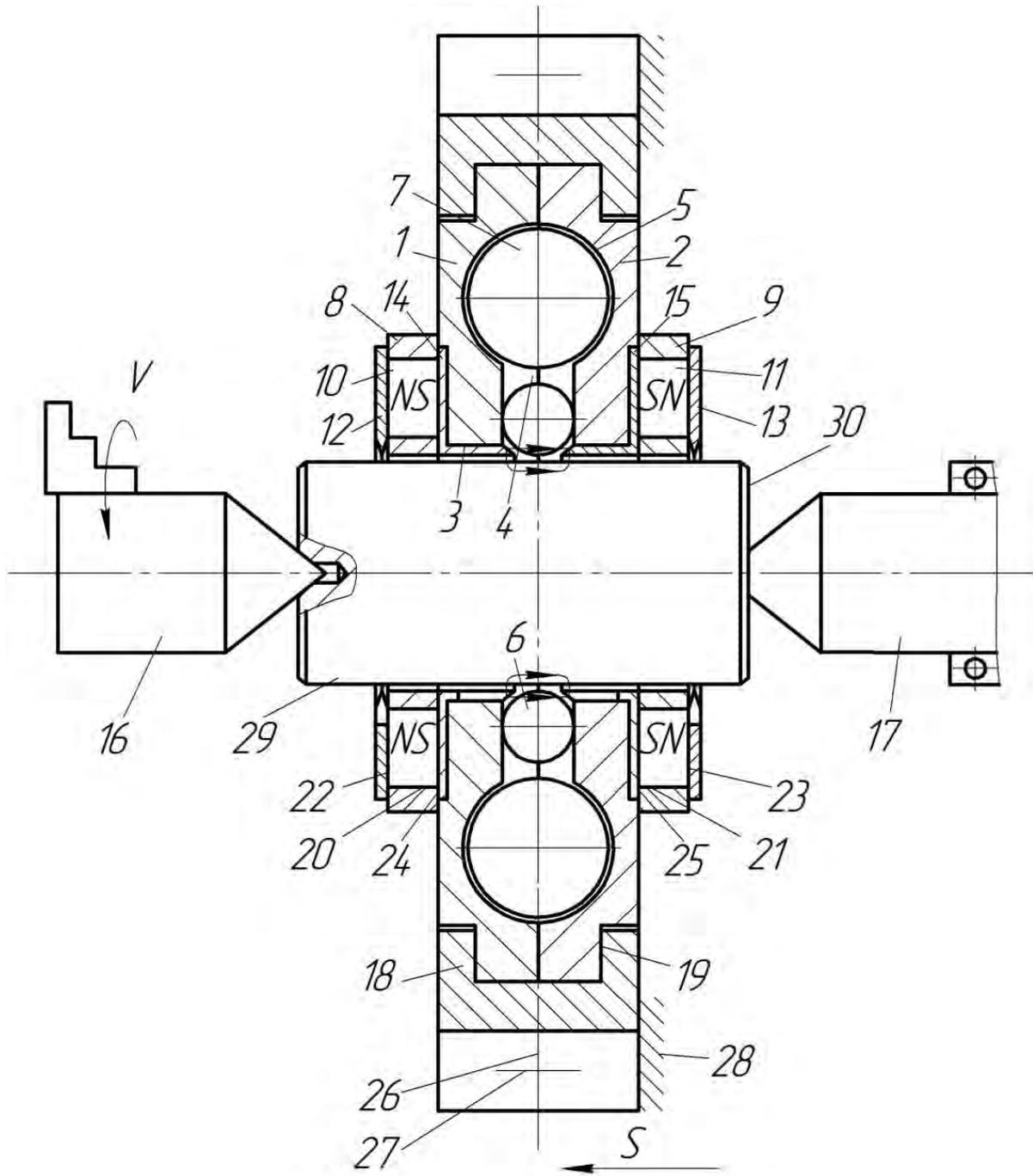


Рис. 1. Конструкция устройства для импульсно-ударного накатывания поверхности вала

Устройство содержит следующие основные элементы: диски 1, 2 с центральным отверстием 3; сообщающиеся внутреннюю 4 и внешнюю 5 кольцевые камеры; деформирующие шары 6; шары-отражатели 7; магнитную систему, состоящую из обойм 8, 9, цилиндрических постоянных магнитов 10, 11, магнитопроводов 12, 13 для намагничива-

ния поверхности вала, зубчатых магнитопроводов 14, 15 для привода деформирующих шаров; центры 16, 17; корпус 18 с центральной выточкой 19.

Внутренняя кольцевая камера 4 выходит в полость отверстия 3 дисков 1, 2. Деформирующие шары 6 установлены во внутренней кольцевой ка-

мере 4, а шары-отражатели – во внешней кольцевой камере 5.

Цилиндрические постоянные магниты 10, 11 установлены в радиальных отверстиях 20, 21 обойм 8, 9 с одинаковым расположением полюсов и взаимодействуют с торцами 22, 23 магнитопроводов 12, 13 и 24, 25 зубчатых магнитопроводов 14, 15. Обоймы 8, 9 закреплены на дисках 1, 2 соосно центральному отверстию 3, симметрично плоскости вращения 26 деформирующих шаров 6. Диски 1, 2 установлены в центральной выточке 19 корпуса 18. Центры 16, 17 расположены соосно друг другу и продольной оси центрального отверстия 3 дисков 1, 2.

Диски 1, 2, обоймы 8, 9, центры 16, 17, корпус 18 выполнены из немагнитопроводных материалов.

Устройство работает следующим образом. Центр 16 закрепляют в патроне станка с возможностью передачи крутящего момента, а центр 17 – в подшипниковой опоре, расположенной в пиноли станка. Корпус 18 крепят винтами 27 на суппорте 28 станка. Радиальным перемещением резцедержателя совмещают продольную ось центров 16, 17 с продольной осью отверстия 3 дисков 1, 2. Обрабатываемый вал 29 вводят в отверстие 3 дисков 1, 2 и закрепляют в центрах 16, 17. Ось симметрии кольцевых камер 4, 5, совпадающую с плоскостью вращения 26 деформирующих шаров 6, совмещают с правым (относительно чертежа) торцом вала 30. Линии магнитного поля замыкаются через магнитопроводы 12, 13 и поверхность ферромагнитного вала 29 или, при обработке немагнитных материалов, через деформирующие шары 6.

Валу 29 сообщают вращение, а корпусу 18 устройства – движение подачи. Намагниченный вращаемый участок вала 29, а также магнитопроводы 14, 15 воздействуют на деформирующие шары 6 и разгоняют их в окружном направлении кольцевой камеры 4. Под действием возникающей центро-

бежной силы деформирующие шары расходятся в радиальном направлении до шаров-отражателей 7. Периодически сталкиваясь с шарами-отражателями 7, деформирующие шары 6 меняют траекторию своего движения в направлении к упрочняемой поверхности вала 29, достигают ее и, соударяясь с поверхностью вала, осуществляют динамическое упрочнение. Причем поверхностное пластическое деформирование поверхности осуществляется в металле, находящемся в напряженном состоянии под действием магнитного поля. Фактически имеет место совмещенное упрочнение – импульсно-ударным деформированием и магнитным полем, что повышает производительность упрочняющей обработки и глубину упрочненного слоя. На поверхности вала формируется новый рельеф с низкой шероховатостью и профилем, представляющим собой пересечение лунок от деформирующих шаров, внедряемых в поверхность при динамическом ударе.

Математическое моделирование процесса импульсно-ударного накатывания наружных цилиндрических поверхностей во вращающемся магнитном поле

Процесс импульсно-ударного накатывания наружных поверхностей вращения реализуется механической системой, состоящей из устройства намагничивания поверхностного слоя ферромагнитной детали, вращающейся ферромагнитной детали, деформирующих шаров и шаров-отражателей, установленных в кольцевых камерах инструмента с возможностью взаимодействия (см. рис. 1 и 2).

Для выполнения математического моделирования данной механической системы введем следующие допущения [7]:

- продольная ось инструмента располагается горизонтально;
- рассматриваем движение одного деформирующего шара, т. к. все дефор-

мирующие 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 и зубьям магнитопровода направлена по линии, соединяющей их геометрические центры;

– источники магнитного поля инструмента расположены с равномерным угловым шагом;

– на поверхности ферромагнитного вала магнитная система инструмента создает однородное магнитное поле.

Моделирование движения деформирующего шара от намагниченной детали до шара-отражателя

Рассмотрим движение деформирующего шара относительно подвижных осей координат x_1Oy_1 , связанных с центром масс деформирующего шара (система координат xOy совмещена с центром масс детали) (см. рис. 2, а).

Запишем основное уравнение динамики относительного движения деформирующего шара:

$$m_1 \vec{a}_r = \vec{G} + \vec{N} + \vec{T} + \vec{\Phi}_{en} + \vec{\Phi}_{et} + \vec{F}_{mp} + \vec{F}_{МД} + \vec{F}_{МЗ}, \quad (1)$$

где m_1 – масса деформирующего шара; \vec{a}_r – относительное ускорение центра масс деформирующего шара; \vec{G} – сила тяжести деформирующего шара;

\vec{N}, \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 (при отрыве от намагниченной поверхности детали $\vec{\Phi}_{en} = 0$); $\vec{\Phi}_{et}$ – касательная составляющая переносной силы инерции (при установившемся режиме угловая скорость вращения намагниченного вала – величина постоянная, следовательно, $\vec{\Phi}_{et} = 0$); $\vec{F}_{МД}, \vec{F}_{МЗ}$ – составляющие силы магнитного притяжения деформирующего шара к намагниченной поверхности детали и зубьям магнитопровода соответственно; \vec{F}_{mp} – сила трения скольжения деформирующего шара о поверхность дисков. Так как деформирующие шары установлены с боковыми осевыми зазорами во внутренней кольцевой камере инструмента, то трение скольжения пренебрежительно мало либо вовсе отсутствует ($\vec{F}_{mp} = 0$).

До отрыва деформирующего шара от поверхности намагниченной детали силы \vec{G}, \vec{T} и \vec{N} уравнивают друг друга.

После отрыва деформирующего шара от поверхности детали силой \vec{G} пренебрегаем, т. к. она значительно меньше остальных, действующих на него сил.

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

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

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

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

деформирующего шара и упрочняемой детали соответственно.

Сила магнитного притяжения определяется как геометрическая сумма

составляющих магнитных сил, действующих со сторон ферромагнитного вала и зубьев магнитопровода.

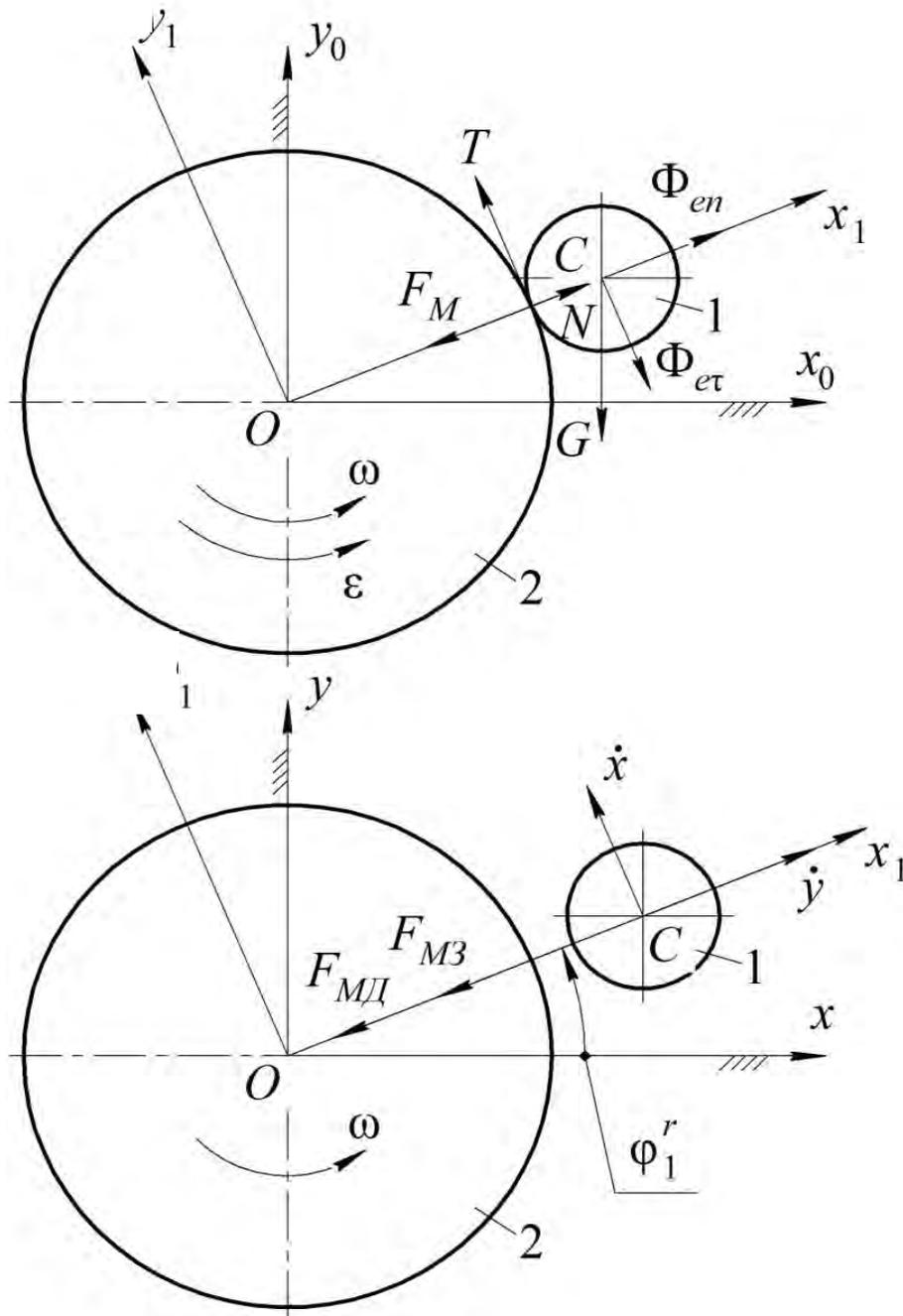


Рис. 2. Схема движения деформирующего шара: *a* – в момент отрыва от намагниченной детали; *b* – после отрыва от детали и перемещения к шару-отражателю; 1 – деформирующий шар инструмента; 2 – поперечное сечение намагниченного вращающегося вала

Магнитная сила, действующая на деформирующий шар со стороны детали, определяется по известной зависимости [8]. С высокой достоверностью указанная функция силы аппроксимируется следующим простым выражением:

$$F_{MD} = A_1(r - r_1)^{-b_1}, \quad (4)$$

где A_1 , b_1 – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств магнитного поля, а также материала упрочняемой детали и деформирующего шара; r – расстояние между геометрическими центрами деформирующего шара и ферромагнитной детали.

Ввиду вышеуказанного запишем силу магнитного притяжения деформирующего шара к зубьям магнитопровода:

$$F_{M3} = A_2 r_3^{-b_2}, \quad (5)$$

где A_2 , b_2 – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств магнитного поля, формы зубьев и материала зубчатого магнитопровода; r_3 – расстояние от центра деформирующего шара до зуба магнитопровода.

Определим расстояние от центра деформирующего шара до зуба магнитопровода. Рассмотрим рис. 3.

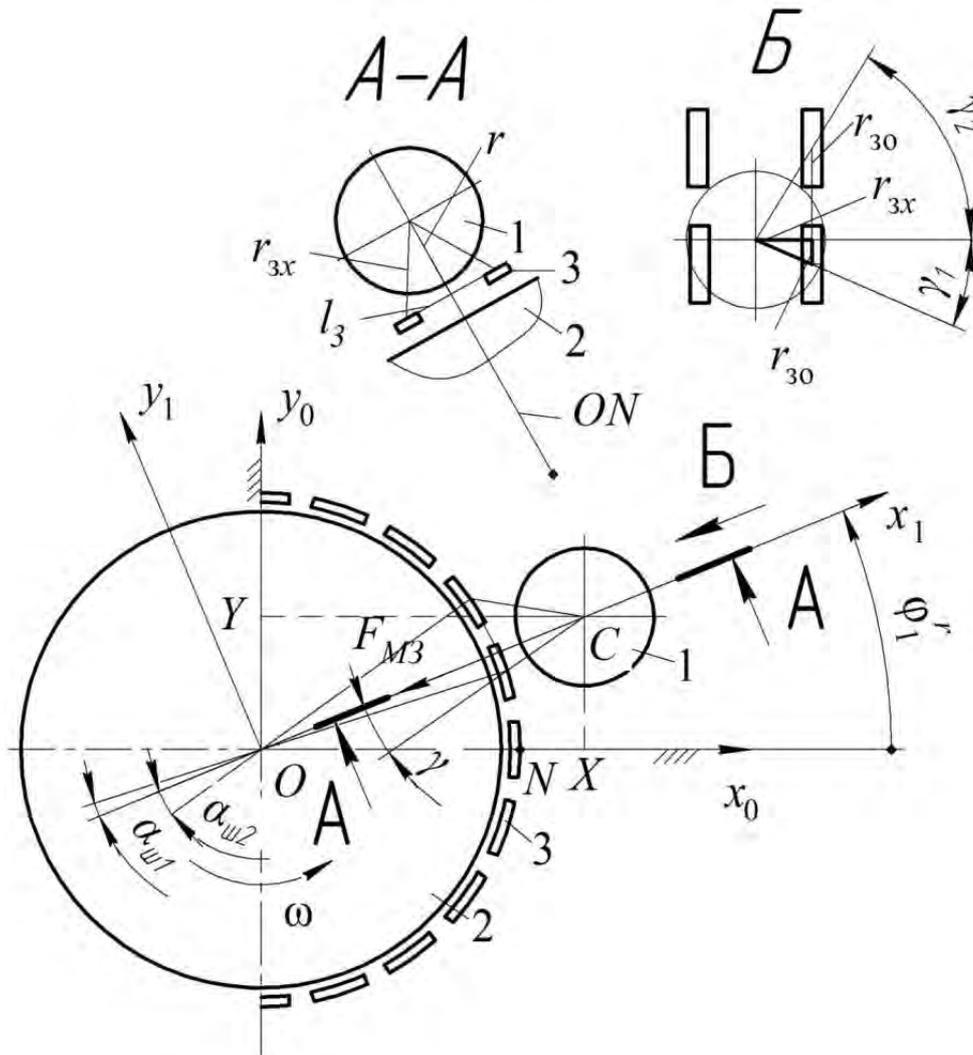


Рис. 3. Схема для расчета силы магнитного притяжения деформирующего шара к зубчатому магниту: 1 – деформирующий шар; 2 – вращающийся вал; 3 – зубья магнитопровода

Расстояние от центра деформирующего шара до зуба магнитопровода r_{zx} в сечении, проходящем через ось Ox_1 перпендикулярно поперечному сечению,

$$r_{zx}^2 = l_3^2 + (r - ON)^2, \quad (6)$$

где l_3 – расстояние от оси симметрии зуба в поперечном сечении до плоскости движения шара; ON – радиальный размер внутренней поверхности зубчатого магнитопровода.

Величина окружного смещения шара определяется как

$$r_{zo} = r_{zx} \cdot \operatorname{tg} \gamma, \quad (7)$$

где γ – угол смещения в окружном направлении деформирующего шара относительно оси симметрии зуба.

Угол смещения в окружном направлении шара найдем по теореме синусов:

$$\frac{ON}{\sin \gamma} = \frac{r}{\sin \alpha_{u1}},$$

откуда, в соответствии с рис. 3,

$$\gamma_1 = \arcsin \left(\frac{ON \sin \alpha_{u1}}{r} \right); \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \arcsin \left(\frac{ON \sin \alpha_{u2}}{r} \right), \quad (9)$$

где α_{u1} , α_{u2} – углы между линиями, соединяющими геометрический центр детали с геометрическим центром деформирующего шара и с геометрическим центром соответствующего зуба.

Так как сила магнитного притяже-

ния стремительно убывает при удалении от магнита, то целесообразно рассмотреть взаимодействие шара только со смежными зубьями магнитопровода.

Тогда можно ввести условие

$$\alpha_{u1} = \varphi_r - i \frac{2\pi}{z_3}; \quad (10)$$

$$\alpha_{u2} = \frac{2\pi}{z_3} - \alpha_{u1} = \frac{2\pi}{z_3} (1 + i) - \varphi_r, \quad (11)$$

где i – целая часть числа, определяющая положение шара,

$$i = \left\lfloor \frac{\varphi_r}{2\pi / z} \right\rfloor; \quad (12)$$

φ_r – угол поворота деформирующего шара относительно неподвижной системы координат xOy .

Из рис. 3 следует

$$\varphi_r = \operatorname{arctg} \left(\frac{X}{Y} \right). \quad (13)$$

Радиус-вектор, соединяющий геометрический центр деформирующего шара и геометрический центр магнитопроводного зуба, определяется как

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_{zx} + \vec{r}_{zo},$$

а его длина как

$$r_3 = \sqrt{r_{zx}^2 + r_{zo}^2}. \quad (14)$$

Подставляя (6)–(13) в выражение (14), получаем

$$r_{31} = \sqrt{\left(l_3^2 + (r - ON)^2\right) \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\operatorname{arcsin} \left(\frac{ON \sin \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{X}{Y} \right) - i \cdot \frac{2\pi}{z_3} \right)}{r} \right) \right) \right)}; \quad (15)$$

$$r_{32} = \sqrt{\left(l_3^2 + (r - ON)^2\right) \left(1 + \operatorname{tg}^2 \left(\operatorname{arcsin} \left(\frac{ON \sin \left(\frac{2\pi}{z_3} (1 + i) - \operatorname{arctg} \left(\frac{Y}{X} \right) \right)}{r} \right) \right) \right)}. \quad (16)$$

Найдем проекции сил магнитного притяжения к зубьям магнитопровода

на оси Ox_1 и Oy_1 :

$$F_{M3(1+2)x} = A_2 r_{31}^{-b_2} \cdot \cos \gamma_1 + A_2 r_{32}^{-b_2} \cdot \cos \gamma_2 = A_2 r_{31}^{-b_2} \left(\cos \gamma_1 + \left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \cos \gamma_2 \right); \quad (17)$$

$$F_{M3(1+2)y} = A_2 r_{31}^{-b_2} \cdot \sin \gamma_1 + A_2 r_{32}^{-b_2} \cdot \sin \gamma_2 = A_2 r_{31}^{-b_2} \left(\sin \gamma_1 + \left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \sin \gamma_2 \right). \quad (18)$$

Так как $r = x^2 + y^2$, то проекции радиус-вектора на подвижные оси координат xOy , связанные с деталью, можно записать как

$$\sin \varphi_r = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (20)$$

$$\cos \varphi_r = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}; \quad (19)$$

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

$$\begin{cases} \ddot{x} = \left(A_1 (r - r_1)^{-b_1} + A_2 r_{31}^{-b_2} \left(\cos \gamma_1 + \left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \cos \gamma_2 \right) \right) \cdot \cos \varphi_r; \\ \ddot{y} = \left(A_1 (r - r_1)^{-b_1} + A_2 r_{31}^{-b_2} \left(\sin \gamma_1 + \left(\frac{r_{32}}{r_{31}} \right)^{-b_2} \cdot \sin \gamma_2 \right) \right) \cdot \sin \varphi_r. \end{cases} \quad (21)$$

При решении системы (21) методами численного интегрирования следует соблюдать краевые условия координат

центра масс и скорости деформирующего шара [7]:

– начальные

$$t = t_0; x = r_1 + r_2; y = 0;$$

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

$$\dot{x} = 0; \dot{y} = \omega r_n; \sqrt{x_0^2 + y_0^2} = r_1 + r_2;$$

– текущие

$$t = t; x = x; y = y; \dot{x} = \dot{x};$$

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

– конечные

$$t = t_k; x = x_k; y = y_k; \dot{x} = \dot{x}_k;$$

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

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 деформирующего шара и проекции скорости деформирующего шара на оси Ox и Oy в начальный и конечный момент фазы движения деформирующего шара от упрочняемой поверхности детали до взаимодействия с шаром-отражателем соответственно.

При численном интегрировании следует соблюдать условие

где OC_{\max} – максимально возможное расстояние между геометрическими центрами детали и деформирующего шара (определяется конструкцией инструмента и угловым положением деформирующего шара).

Заключение

В результате математического моделирования получена система дифференциальных уравнений, описывающих кинематику движения деформирующего шара от намагниченной детали до шара-отражателя при модифицировании наружных цилиндрических поверхностей деталей импульсно-ударным накатыванием и вращающимся магнитным полем. Найдены начальные, текущие и конечные условия для численного интегрирования дифференциальных уравнений и определения кинематических характеристик деформирующего шара при различных режимах обработки и конструктивных параметрах устройства для импульсно-ударного накатывания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довгалев, А. М. Магнитно-динамическое и совмещенное накатывание поверхностей нежестких деталей / А. М. Довгалев. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. – 266 с.
2. Упрочняющий инструмент: пат. ВУ 15364 / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа, Д. М. Рыжанков, С. А. Сухоцкий. – Оpubл. 28.02.2012.
3. Довгалев, А. М. Технология магнитно-динамического раскатывания и ее реализация в машиностроении / А. М. Довгалев, Д. М. Свирепа // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 10–15.
4. Довгалев, А. М. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А. М. Довгалев, И. И. Маковецкий, Д. М. Свирепа // Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 4 (64). – С. 26–30.
5. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки вала: пат. ВУ 18302 / А. М. Довгалев, С. А. Сухоцкий, Д. М. Свирепа, И. А. Тарадейко. – Оpubл. 30.08.2013.
6. Тарадейко, М. В. Двухрядный инструмент для импульсно-ударного деформирования / М. В. Тарадейко, И. А. Тарадейко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2021. – С. 62.
7. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического упрочнения наружной поверхности вращения / А. М. Довгалев [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 4. – С. 25–34.
8. Моделирование процесса совмещенной упрочняющей обработки импульсно-ударным раскатыванием и вращающимся магнитным полем / В. К. Шелег [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 73–84.

Статья сдана в редакцию 7 июля 2023 года

Контакты:

www.rct.bru.by (Довгалеv Александр Михайлович);
svdima@tut.by (Свирепа Дмитрий Михайлович);
IvanTaradeiko@yandex.ru (Тарадейко Марина Вадимовна);
IvanTaradeiko@yandex.ru (Тарадейко Иван Анатольевич);
nik.klass.97@mail.ru (Малиновский Никита Юрьевич).

**A. M. DOVGALEV, D. M. SVIREPA, M. V. TARADEIKO, I. A. TARADEIKO,
N. Y. MALINOVSKY**

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MODIFYING
EXTERNAL CYLINDRICAL SURFACES OF PARTS BY USING
IMPULSE-IMPACT ROLLING AND A ROTATING MAGNETIC FIELD**

Abstract

A mathematical model for the process of modifying external cylindrical surfaces of parts by using impulse-impact rolling and a rotating magnetic field is proposed. Analytical dependencies have been obtained which describe kinematic characteristics of the deforming ball at the moment of its movement from a magnetized part to the reflecting ball.

Keywords:

combined processing, surface plastic deformation, magnetic field, impulse-impact rolling, mathematical modeling, modification of external cylindrical surfaces.

For citation:

Mathematical modeling of the process of modifying external cylindrical surfaces of parts by using impulse-impact rolling and a rotating magnetic field / A. M. Dovgalev, D. M. Svirepa, M. V. Taradeiko, I. A. Taradeiko, N. Y. Malinovsky // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2023. – № 3 (80). – P. 16–25.