

УДК 621.787

В.К. Шелег, д.т.н., проф.*Білоруський національний технічний університет***О.М. Довгальов, к.т.н., доц.****О.О. Жолобов, к.т.н., проф.****М.А. Леванович, к.т.н., доц.***Білорусько-Російський університет***В.А. Кирилович, к.т.н., проф.***Житомирський державний технологічний університет*

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОЄДНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ МАГНІТНО-ДИНАМІЧНИМ РОЗКОЧУВАННЯМ І ОБЕРТОВИМ ЗМІННИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

Розглянуто метод оздоблювальної обробки, що поєднує зміцнення магнітно-динамічним розкочуванням та обертовим змінним магнітним полем. Виконано моделювання процесу й отримано систему диференціальних рівнянь, що описують кінематику руху деформувальних куль. Встановлено початкові та кінцеві умови для чисельного інтегрування диференціальних рівнянь і визначення кінематичних характеристик деформувальної кулі при різних режимах поєднаної зміцнювальної обробки.

Ключові слова: *магнітно-динамічне розкочування, магнітне поле, деформування, кінематика руху.*

Вступ. За останні десятиліття істотно зросли швидкісні та силові характеристики сучасних технічних систем. Відповідно зросли вимоги до якісних та експлуатаційних властивостей поверхонь деталей, що визначає надійність і довговічність механізмів.

Підвищення якісних та експлуатаційних властивостей поверхонь деталей забезпечують існуючі технології зміцнювальної обробки, що здійснюють модифікацію поверхневого шару: механічні; термічні; хіміко-термічні; іонної імплантації; азотування в тліючому розряді; лазерного гартування тощо. Вибір технології зміцнювальної обробки, залежить від умов експлуатації деталі, її форми, розмірів, матеріалу та ряду інших факторів [1, 2].

Постановка проблеми. Відомі зміцнювальні технології обробки є досить трудомісткими, реалізуються на спеціальному дорогому обладнанні, мають високу собівартість, в своїй більшості неприйнятні для зміцнення великогабаритних деталей, не дозволяють поєднати в один технологічний перехід модифікацію поверхневого шару і формування раціонального мікрорельєфу поверхні деталі і, як правило, шкідливо впливають на навколишнє середовище [3].

У зв'язку з цим, удосконалення існуючих і створення нових зміцнювальних технологій обробки деталей машин є актуальним завданням.

Найбільш універсальними та прийнятними для широкої номенклатури деталей, які підлягають зміцненню, і не мають зазначених вище недоліків, є технології оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхневим пластичним деформуванням, що дозволяють модифікувати поверхневий шар і забезпечувати високі експлуатаційні характеристики поверхні [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільший інтерес являють сучасні технології поверхневого пластичного деформування з комбінованим видом енергетичного впливу на зміцнювальну поверхню деталі, що дозволяє отримати модифікований поверхневий шар з унікальними характеристиками [6–12].

До перспективних належить розроблена технологія поєднаної оздоблювально-зміцнювальної обробки, поверхні отвору деталей машин магнітно-динамічним розкочуванням та обертовим змінним магнітним полем. Запропонована технологія дозволяє поєднати в часі магнітний та імпульсно-силовий вплив на локальний ділянку поверхневого шару деталі і забезпечити модифікацію структури і фазового складу зміцненого шару, що має технологічне значення і підвищує експлуатаційні характеристики поверхні деталі [13].

На рисунку 1 показана схема реалізації запропонованої технології поєднаного зміцнення імпульсно-силовим поверхневим пластичним деформуванням і обертовим магнітним полем за допомогою спеціального комбінованого інструмента.

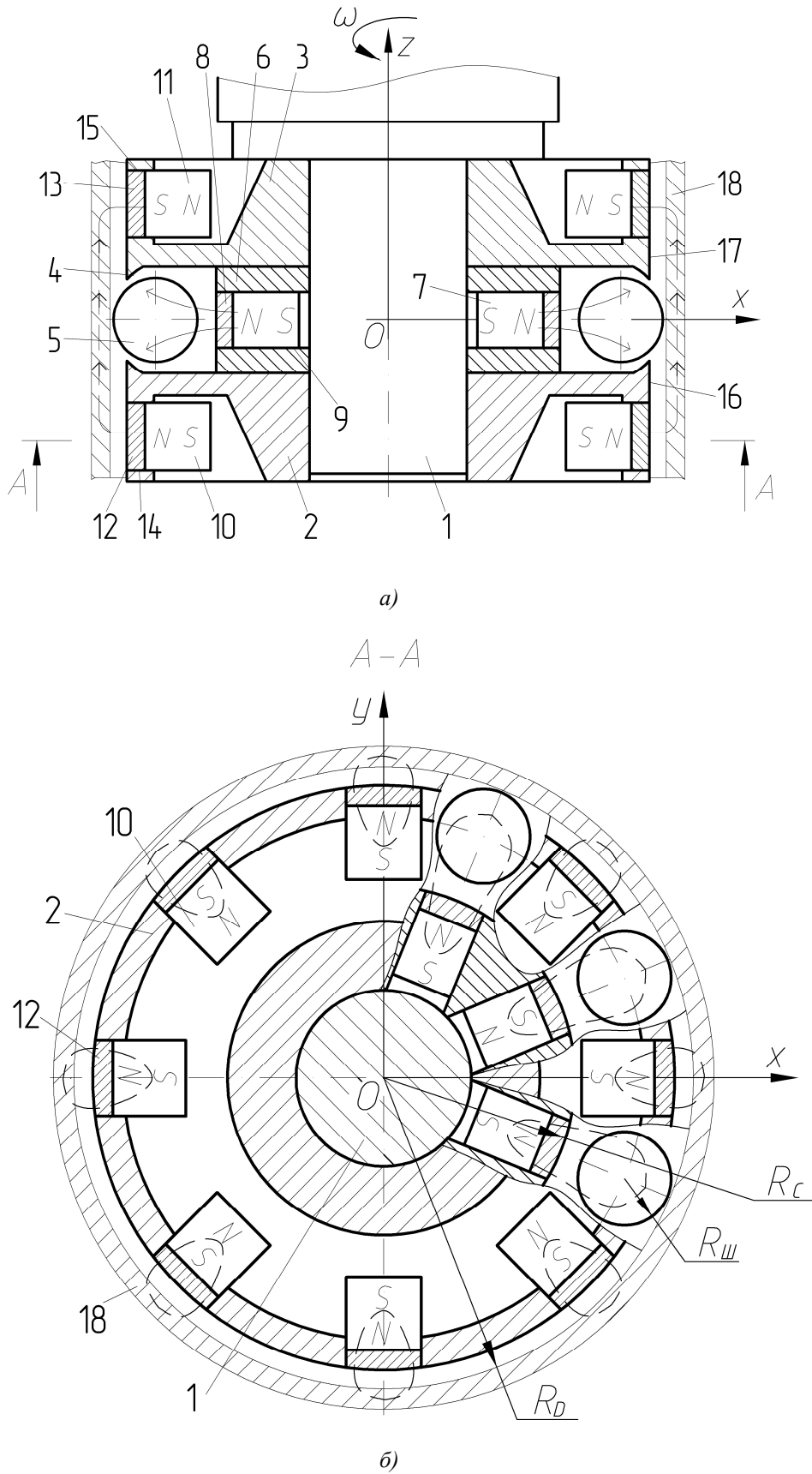


Рис. 1. Схема поєднаної обробки магнітно-динамічним розкочуванням та обертовим змінним магнітним полем (а – загальний вигляд схеми; б – поперечний переріз комбінованого інструмента)

Комбінований інструмент містить оправку 1; диски 2, 3, які створюють кільцеву камеру 4; деформувальні кулі 5; магнітну систему, призначену для надання кругового обертання і коливання деформувальним кулям 5, що містить обойму 6; циліндричні постійні магніти 7 і магнітопроводи 8.

Деформувальні кулі 5 вільно встановлені в кільцевій камері 4 інструмента. Постійні магніти 7 і магнітопроводи 8 розміщені з рівномірним кутовим кроком у радіальних отворах 9 обойми 6. Кількість постійних магнітів 7 парне і вони розташовані з чергуванням полюсів S і N. Інструмент забезпечений пристроєм впливу на поверхневий шар феромагнітної деталі, яка зміцнюється, обертовим змінним магнітним полем, виконаним у вигляді циліндричних постійних магнітів 10, 11 і магнітопроводів 12, 13, розташованих з рівномірним кутовим кроком у радіальних отворах 14, 15 відповідно дисків 2, 3. Кількість постійних магнітів 10 і 11 в кожному з дисків 2, 3 парне, і вони встановлені з чергуванням полюсів S і N. При цьому кутове розташування постійних магнітів 10 і 11 відповідно в дисках 2, 3 є ідентичним. Постійні магніти 10 і 11 в дисках 2, 3, що знаходяться один проти одного, мають протилежні знаки полюсів (рис. 1). Магнітопроводи 12, 13 запресовані в радіальних отворах 14, 15 дисків 2, 3 і виконані врівень з циліндричними поверхнями 16, 17. Оправка 1, диски 2, 3 і обойма 6 виконані з немагнітного матеріалу.

Інструмент працює наступним чином. Феромагнітну деталь 18 встановлюють в технологічному обладнанні, а оправку 1 інструмента закріплюють у шпинделі верстата. Поєднують поздовжні осі інструмента і деталі 18. Осьовим переміщенням оправки 1 вводять деформувальні кулі 5 в оброблюваний отвір. Силкові лінії магнітного поля від протилежних полюсів постійних магнітів 10, 11 замикаються на поверхневий шар феромагнітної деталі 18 (силкові лінії магнітного поля на рис. 1 умовно показано тонкою лінією). Якщо постійний магніт 10 на диску 2 має північний полюс N, а південний полюс S має постійний магніт 11, закріплений на диску 3, то магнітні лінії, що проходять через поверхневий шар деталі 18, спрямовані від північного полюса до південного. При повороті постійних магнітів 10, 11 на кутовий крок напрям силкових ліній магнітного поля, що діє на поверхневий шар деталі 18, зміниться на 180° , оскільки постійний магніт 10 має південний полюс S, а магніт 11 – північний полюс N.

Оправці 1 надають обертання і переміщують інструмент уздовж оброблюваної поверхні. При цьому на локальну ділянку поверхнього шару деталі, що зміцнюється, 18, діє обертове змінне магнітне поле із зміною напрямку силкових ліній, що створюється постійними магнітами 10, 11. На деформувальні кулі 5 періодично діє обертове магнітне поле постійних магнітів 7, розташованих рівномірно по колу обойми 6. Під дією магнітного поля деформувальні кулі 5 отримують переміщення вздовж кільцевої камери 4 інструмента і радіальні коливальні рухи. В результаті деформувальні кулі 5 періодично стикаються з поверхнею деталі, яка зміцнюється, 18 і здійснюють її імпульсно-ударне поверхнєве пластичне деформування.

Таким чином, у процесі реалізації технології поєданого зміцнення має місце комплексний вплив на поверхневий шар деталі, що обертається, змінним магнітним полем та імпульсно-силовим деформуванням, що інтенсифікує процес модифікації поверхнього шару деталі і забезпечує підвищення його експлуатаційних властивостей.

Метою досліджень є подання математичного моделювання механічної системи, що реалізує процес поєданої обробки деталей магнітно-динамічним розкочуванням (МДР) і обертовим змінним магнітним полем.

Виклад основного матеріалу досліджень. При розробці математичної моделі даної механічної системи введемо наступні припущення:

- поздовжня вісь інструмента розташована вертикально, а переміщення деформувальних куль в кільцевій камері інструмента здійснюється в горизонтальній площині;
- розглядаємо взаємодію деформувальних куль з найближчими джерелами магнітного поля інструмента, які надають їм робочий рух, і намагніченою поверхнею деталі;
- сили магнітного взаємодії деформувальної кулі з деталлю спрямовані по лініях, що з'єднують її геометричний центр з точками, отриманими перетином радіальних променів з оброблюваною поверхнею, що проходять через геометричні центри двох найближчих по розташуванню джерел магнітного поля інструмента, що забезпечують намагнічування поверхнього шару деталі;
- впливом сусідніх деформувальних куль на сили магнітної взаємодії розглянутої деформувальної кулі з джерелами магнітного поля інструмента і намагніченою поверхнею деталі нехтуємо;
- магнітну взаємодію між деформувальними кулями інструмента не враховуємо;
- досліджуємо рух деформувальної кулі в площині, що є нормальною щодо осі обертання інструмента;
- деформувальну кулю розглядаємо як матеріальну точку масою m , вміщену в центр сфери відповідного радіуса;
- сили магнітної взаємодії деформувальної кулі з джерелами магнітного поля інструмента, що надають йому робочий рух, спрямовані по лініях, що з'єднують їх геометричні центри.

Виконаємо послідовне моделювання наявних в процесі поєднаної технології зміцнювальної обробки фаз руху деформувальної кулі.

1. Розглянемо рух деформувальної кулі від магнітної системи інструмента до оброблюваної поверхні деталі (рис. 2). Запишемо основне рівняння руху деформувальної кулі як матеріальної точки після її відриву від магнітної системи:

$$m\vec{a} = \vec{F}^{mp} + \vec{F}_M + \vec{G} + \vec{N}, \quad (1)$$

де m – маса деформувальної кулі; a – прискорення деформувальної кулі; \vec{F}^{mp} – сила тертя ковзання деформувальної кулі по поверхні диска інструмента (на рис. 1, 2 не показана); \vec{F}_M – сумарна магнітна сила, що діє на деформувальну кулю; \vec{G} – сила тяжіння деформувальної кулі $\vec{G} = m \cdot \vec{g}$; \vec{g} – прискорення вільного падіння; \vec{N} – нормальна реакція, що діє на деформувальні кулі з боку диска інструмента (на рис. 1, 2 не показана).

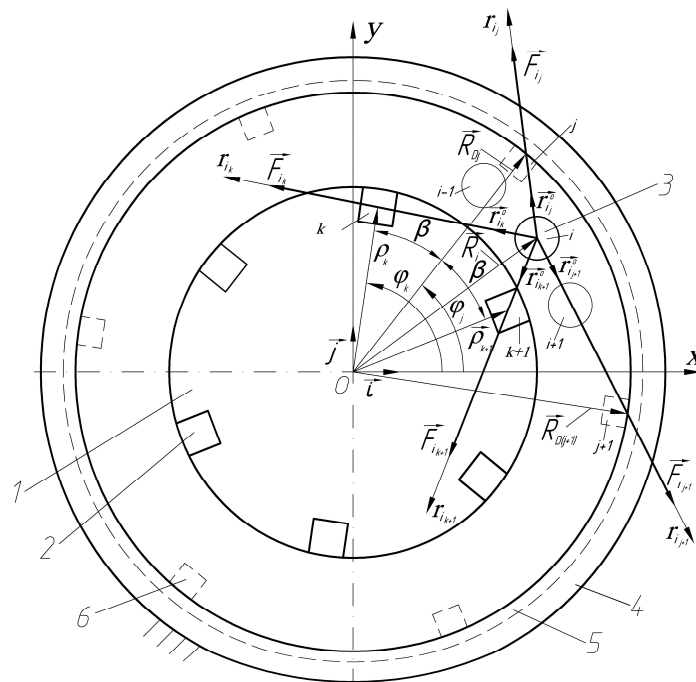


Рис. 2. Схема руху деформувальної кулі від магнітної системи інструмента до поверхні деталі, яку зміцнюють; 1 – магнітна система інструмента; 2 – джерела магнітного поля, надають деформувальній кулі робочого руху; 3 – деформувальна куля; 4 – оброблювана деталь; 5 – поверхневий шар деталі, який намагнічується; 6 – умовне зображення джерел магнітного поля інструмента, що забезпечують намагнічування поверхневого шару деталі

Розглянемо сили, що входять до рівняння (1).

Сумарну магнітну силу \vec{F}_M визначимо, як векторну суму сил взаємодії деформувальної кулі з найбільш близько розташованими джерелами магнітного поля інструмента, що надають йому робочого руху, і намагніченими ділянками поверхні феромагнітної деталі.

Сили магнітної взаємодії деформувальної кулі з джерелами магнітного поля інструмента, що надають йому робочого руху, визначимо як:

$$\vec{F}_{ik} = (r) \vec{r}_{ik}^0; \vec{F}_{i(k+1)} = (r) \vec{r}_{i(k+1)}^0. \quad (2)$$

Сили магнітної взаємодії деформувальної кулі з намагніченими ділянками поверхні феромагнітної деталі дорівнюють:

$$\vec{F}_{ij} = (R) \vec{r}_{ij}^0; \vec{F}_{i(j+1)} = (R) \vec{r}_{i(j+1)}^0, \quad (3)$$

де i – i -та деформувальна куля інструмента ($i = 1, 2, \dots, \ell$); k – k -те джерело магнітного поля інструмента, що надає деформувальним кулям робочого руху ($k = 1, 2, \dots, n$); j – j -те джерело магнітного поля інструмента, який здійснює намагнічування поверхневого шару феромагнітної деталі ($j = 1, 2, \dots, m$); \vec{F}_{ik} та $\vec{F}_{i(k+1)}$ – сили магнітної взаємодії i -ої деформувальної кулі з k -им та $(k+1)$ -им джерелами магнітного

поля інструмента відповідно; \vec{F}_{ij} та $\vec{F}_{i(j+1)}$ – сили магнітної взаємодії i -ої деформувальної кулі з намагніченими ділянками поверхні деталі в зоні розташування j -го та $(j+1)$ -го джерел магнітного поля інструмента; $\varphi(r)$, $\varphi(R)$ – скалярні функції, що визначають модуль сили взаємодії магнітної деформувальної кулі з джерелами магнітного поля, що повідомляють їм робочий рух і здійснюють намагнічування поверхневого шару деталі, при їх відносному розташуванні відповідно на відстані r_{ik} , $r_{i(k+1)}$, r_{ij} , $r_{i(j+1)}$; \vec{r}_{ik}^0 , $\vec{r}_{i(k+1)}^0$, \vec{r}_{ij}^0 , $\vec{r}_{i(j+1)}^0$ – одиничні вектори, спрямовані від i -ої деформувальної кулі до відповідних джерел магнітного поля інструмента і намагніченим ділянцям поверхні деталі.

З рисунку 2 випливає, що одиничні вектори \vec{r}_{ik}^0 , $\vec{r}_{i(k+1)}^0$, \vec{r}_{ij}^0 , $\vec{r}_{i(j+1)}^0$ і відповідні відстані r_{ik} , $r_{i(k+1)}$, r_{ij} , $r_{i(j+1)}$ між деформувальною кулею, джерелом магнітного поля інструмента і намагніченою ділянкою поверхні деталі визначаються за формулами:

$$\vec{r}_{ik}^0 = \frac{\vec{\rho}_k - \vec{R}_i}{r_{ik}}; \vec{r}_{i(k+1)}^0 = \frac{\vec{\rho}_{k+1} - \vec{R}_i}{r_{i(k+1)}}; \quad (4)$$

$$\vec{r}_{ij}^0 = \frac{\vec{R}_{Dj} - \vec{R}_i}{r_{ij}}; \vec{r}_{i(j+1)}^0 = \frac{\vec{R}_{D(j+1)} - \vec{R}_i}{r_{i(j+1)}};$$

$$r_{ik} = |\vec{\rho}_k - \vec{R}_i|; r_{i(k+1)} = |\vec{\rho}_{k+1} - \vec{R}_i|; \quad (5)$$

$$r_{ij} = |\vec{R}_{Dj} - \vec{R}_i|; r_{i(j+1)} = |\vec{R}_{D(j+1)} - \vec{R}_i|,$$

де $\vec{\rho}_k$ і $\vec{\rho}_{k+1}$ – радіус-вектори між геометричними центрами обойми і джерелами магнітного поля, що надають деформувальній кулі робочого руху; \vec{R}_i – радіус-вектор між геометричними центрами обойми та i -ої деформувальної кулі; \vec{R}_{Dj} і $\vec{R}_{D(j+1)}$ – радіус-вектори, що визначають положення j -го та $j+1$ -го джерел магнітного поля інструмента, що здійснюють намагнічування поверхневого шару деталі ($\vec{R}_{Dj} = \vec{R}_{D(j+1)} = \vec{R}_D$).

Представимо вираз (5) в координатному вигляді:

$$r_{ik} = \sqrt{(x_i - \rho \cos \varphi_k)^2 + (\rho \sin \varphi_k - y_i)^2}; \quad (6)$$

$$r_{i(k+1)} = \sqrt{(x_i - \rho \cos(\varphi_k - 2\beta))^2 + (y_i - \rho \sin(\varphi_k - 2\beta))^2}; \quad (7)$$

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - R_D \cos \varphi_j)^2 + (R_D \sin \varphi_j - y_i)^2}; \quad (8)$$

$$r_{i(j+1)} = \sqrt{(R_D \cos(\varphi_j - 2\beta) - x_i)^2 + (y_i - R_D \sin(\varphi_j - 2\beta))^2}, \quad (9)$$

де \vec{i} , \vec{j} – одиничні координатні орти; ω – кутова швидкість обертання джерел магнітного поля; t – час руху деформувальної кулі; φ_0 – початкове зміщення системи джерел магнітного поля відносно координатної осі OX; φ_k , φ_j – кути, що визначають положення геометричних центрів сусідніх джерел магнітного поля інструмента, що надають деформувальним кулям робочого руху, і що намагнічують поверхневий шар деталі (рис. 2).

Оскільки в обоймі інструмента рівномірно розподілено n джерел магнітного поля, що надають деформувальним кулям робочого руху, то координати (ρ_x, ρ_y) радіус-вектора $\vec{\rho}_k$ для k -го джерела магнітного поля визначаються як:

$$\vec{\rho}_k = \rho \cdot \cos\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{2\pi(k-1)}{n}\right) \cdot \vec{i} + \rho \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_0 - \frac{2\pi(k-1)}{n}\right) \cdot \vec{j}; \quad (10)$$

$$\rho_k = \rho_{k+1} = \rho = \text{const};$$

$$\varphi_k = \varphi_0 + \omega t - \frac{2\pi}{n}(k-1); \quad (11)$$

$$\varphi_j = \varphi_k - \beta; \quad (12)$$

$$\beta = \frac{\pi}{n},$$

де β – кут між сусідніми джерелами магнітного поля інструмента, що надають деформувальним кулям робочий рух і які намагнічують поверхневий шар деталі; n – кількість джерел магнітного поля інструмента, що надають деформувальним кулям робочий рух.

Таким чином, сили магнітної взаємодії деформувальної кулі з джерелами магнітного поля інструмента, що надають йому робочий рух, і з намагніченими ділянками поверхні деталі відповідно дорівнюють:

$$\vec{F}_{ik} = \varphi(r) \frac{x_i - \rho \cos \varphi_k}{r_{ik}} \vec{i} + \varphi(r) \frac{\rho \sin \varphi_k - y_i}{r_{ik}} \vec{j}; \quad (13)$$

$$\vec{F}_{i(k+1)} = \varphi(r) \frac{x_i - \rho \cos(\varphi_k - 2\beta)}{r_{i(k+1)}} \vec{i} + \varphi(r) \frac{y_i - \rho \sin(\varphi_k - 2\beta)}{r_{i(k+1)}} \vec{j}; \quad (14)$$

$$\vec{F}_{ij} = \varphi(R) \frac{x_i - R_D \cos \varphi_j}{r_{ij}} \vec{i} + \varphi(R) \frac{R_D \sin \varphi_j - y_i}{r_{ij}} \vec{j}; \quad (15)$$

$$\vec{F}_{i(j+1)} = \varphi(R) \frac{R_D \cos(\varphi_j - 2\beta) - x_i}{r_{i(j+1)}} \vec{i} + \varphi(R) \frac{y_i - R_D \sin(\varphi_j - 2\beta)}{r_{i(j+1)}} \vec{j}. \quad (16)$$

Скалярні функції $\varphi(r)$, $\varphi(R)$ доцільно визначати експериментально, вимірюючи силу магнітного тяжіння деформувальної кулі до джерел магнітного поля інструмента, що надає деформувальним кулям робочий рух і намагніченим ділянках поверхні деталі при різних відстанях між ними. На основі статистичного аналізу і методу найменших квадратів встановлено, що найбільш достовірно функції $\varphi(r)$ і $\varphi(R)$ описує степенева залежність [14]:

$$\varphi(r) = a_1 \cdot e^{b_1 r}; \quad (17)$$

$$\varphi(R) = a_2 \cdot e^{b_2(R_0 - R)}, \quad (18)$$

де a_1 , b_1 , a_2 , b_2 – емпіричні коефіцієнти, які залежать від розмірів і характеристик джерел магнітного поля інструмента і діаметра деформувальної кулі.

Знаходимо силу тертя ковзання деформувальної кулі по поверхні диска інструмента:

$$\vec{F}^{mp} = -fN \frac{\vec{v}}{v} = -fmg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \cdot \vec{i} - fmg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \cdot \vec{j}, \quad (19)$$

де f – коефіцієнт тертя ковзання деформувальної кулі по поверхні диска інструмента; N – нормальна реакція, що діє на деформувальну кулю з боку диска інструмента, $N = mg$; \vec{v} – вектор швидкості деформувальної кулі; v – модуль вектора швидкості деформувальної кулі; δ – проекція вектора швидкості деформувальної кулі на вісь OX; \dot{y} – проекція вектора швидкості деформувальної кулі на вісь OY.

Оскільки рух деформувальних куль відбувається в горизонтальній площині, то проекції сил \vec{G} і \vec{N} на осі OX і OY дорівнюють нулю.

Записавши рівняння (1) в проекціях на осі OX і OY, отримаємо диференціальні рівняння руху деформувальної кулі:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\ddot{x}_i = \varphi(R) \left(\frac{x_i - R_D \cos \varphi_j}{r_{ij}} + \frac{R_D \cos(\varphi_j - 2\beta) - x_i}{r_{i(j+1)}} \right) + \\ + \varphi(r) \left(\frac{x_i - \rho \cos \varphi_k}{r_{ik}} + \frac{x_i - \rho \cos(\varphi_k - 2\beta)}{r_{i(k+1)}} \right) - fmg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ m\ddot{y}_i = \varphi(R) \left(\frac{R_D \sin \varphi_j - y_i}{r_{ij}} + \frac{y_i - R_D \sin(\varphi_j - 2\beta)}{r_{i(j+1)}} \right) + \\ + \varphi(r) \left(\frac{\rho \sin \varphi_k - y_i}{r_{ik}} + \frac{y_i - \rho \sin(\varphi_k - 2\beta)}{r_{i(k+1)}} \right) - fmg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \end{array} \right. \quad (20)$$

Після перетворення системи (20) остаточно запишемо диференціальні рівняння руху деформувальної кулі в зручному для чисельного інтегрування вигляді.

Позначимо

$$\begin{array}{l} \delta = \ddot{O}, \\ \acute{o} = \ddot{Y}. \end{array}$$

Тоді:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{X}_i &= \frac{\varphi(R)}{m} \left(\frac{x_i - R_D \cos \varphi_j}{r_{ij}} + \frac{R_D \cos(\varphi_j - 2\beta) - x_i}{r_{i(j+1)}} \right) + \\ &+ \frac{\varphi(r)}{m} \left(\frac{x_i - \rho \cos \varphi_k}{r_{ik}} + \frac{x_i - \rho \cos(\varphi_k - 2\beta)}{r_{i(k+1)}} \right) - fg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \\ \dot{Y}_i &= \frac{\varphi(R)}{m} \left(\frac{R_D \sin \varphi_j - y_i}{r_{ij}} + \frac{y_i - R_D \sin(\varphi_j - 2\beta)}{r_{i(j+1)}} \right) + \\ &+ \frac{\varphi(r)}{m} \left(\frac{\rho \sin \varphi_k - y_i}{r_{ik}} + \frac{y_i - \rho \sin(\varphi_k - 2\beta)}{r_{i(k+1)}} \right) - fg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \end{aligned} \right. \quad (21)$$

Чисельне рішення системи (21) доцільно здійснювати методом Рунне-Кутта [15], що дозволяє вести чисельне інтегрування з високим ступенем точності. При цьому слід дотримуватися крайових умов координат центра мас і швидкості деформувальної кулі:

$$\text{початкові: } t = t_0; x_i = x_{i0}; y_i = y_{i0}; \dot{x} = \dot{x}_{i0}; \dot{y} = \dot{y}_{i0}; \sqrt{x_{i0}^2 + y_{i0}^2} = R_C + R_\emptyset;$$

$$\text{проміжні: } t = t; x = x_i; y = y_i; \dot{x} = \dot{x}_i; \dot{y} = \dot{y}_i; \sqrt{x_i^2 + y_i^2} = R_j;$$

$$\text{кінцеві: } t = t_{\text{кн}}; x = x_{\text{икн}}; y = y_{\text{икн}}; \dot{x} = \dot{x}_{\text{іел}}; \dot{y} = \dot{y}_{\text{іел}}; \sqrt{x_{\text{іел}}^2 + y_{\text{іел}}^2} = R_D - R_\emptyset,$$

де $t_0, t_{\text{кн}}$ – час в початковий і кінцевий момент фази руху деформувальної кулі від магнітної системи до деталі; $x_{i0}, y_{i0}, x_{\text{икн}}, y_{\text{икн}}$ – відповідні координати центра деформувальної кулі в початковий і кінцевий моменти фази її руху від магнітної системи до деталі; $\dot{x}_{i0}, \dot{y}_{i0}, \dot{x}_{\text{іел}}, \dot{y}_{\text{іел}}$ – проекції вектора швидкості деформувальної кулі на вісь OX і OY відповідно в початковий і кінцевий моменти її фази руху від магнітної системи до деталі; $R_C, R_D, R_{\text{ш}}$ – радіуси магнітної системи інструмента, оброблюваної деталі і деформувальної кулі відповідно.

При цьому при чисельному інтегруванні слід виконувати умову: $\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \leq R_D - R_\emptyset$.

2. Розглянемо процес ударної взаємодії деформувальної кулі з поверхнею оброблюваної деталі.

На підставі представленої на рисунку 3 схеми взаємодії деформувальної кулі з деталлю відповідно до [16] маємо:

$$\text{tg} \alpha_{i2} = \frac{1}{K} \text{tg} \alpha_{i1}, \quad (22)$$

де α_{i1} – кут падіння i -ої деформувальної кулі рівний куту $(\vec{v}_i, \hat{-}\vec{n}_i)$, де \vec{v}_i – вектор швидкості центру мас i -ої деформувальної кулі в момент початку удару; \vec{n}_i – одиничний вектор нормалі, проведеної від поверхні деталі до центра магнітної системи інструмента; α_{i2} – кут відбиття i -ої деформувальної кулі що дорівнює куту $(\vec{u}_i, \hat{-}\vec{n}_i)$, де \vec{u}_i – вектор швидкості центра мас деформувальної кулі в момент закінчення удару; K – коефіцієнт відновлення при ударі.

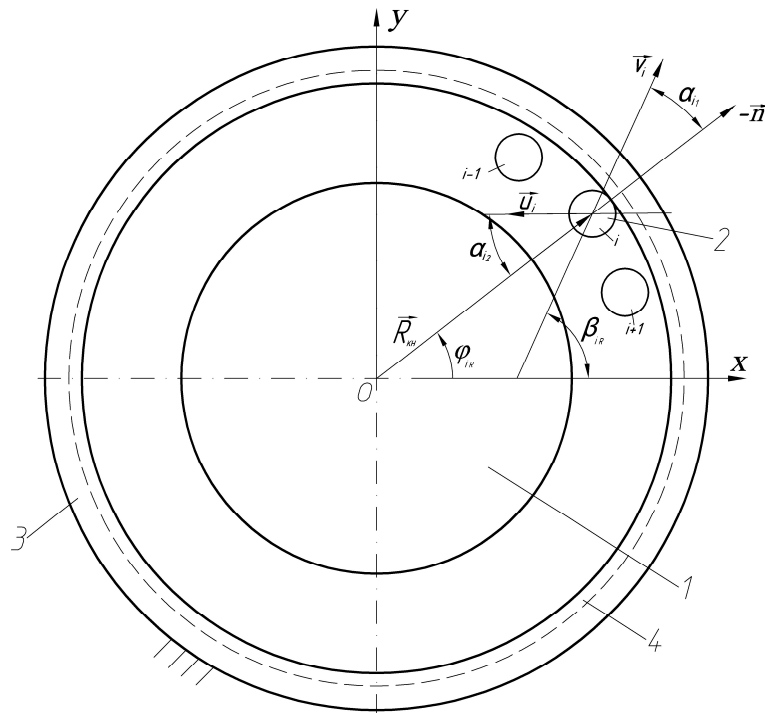


Рис. 3. Схема зіткнення деформувальної кулі з оброблюваною поверхнею:
 1 – магнітна система інструмента; 2 – деформувальна куля;
 3 – оброблювана деталь; 4 – намагнічуваний поверхневий шар

Для визначення кута α_{i2} за формулою (22) необхідно знайти кут α_{i1} .

Залежно від квадранта, в якому розташована деформувальна куля, виходячи з геометричних міркувань, що випливають з рисунку 3, маємо формули для визначення кутів φ_{iR} і β_{iR} :

$$\varphi_{iR} = \operatorname{arctg} \frac{y_{i\dot{e}f}}{x_{i\dot{e}f}};$$

$$\beta_{iR} = \operatorname{arctg} \frac{\dot{y}_{i\dot{e}f}}{\dot{x}_{i\dot{e}f}},$$

де φ_{iR} – кут між додатним напрямком осі OX і радіус-вектором R_{iKH} ($0 \leq \varphi_{iR} < 2\pi$); β_{iR} – кут між додатним напрямком осі OX і вектором швидкості деформувальної кулі ($0 \leq \beta_{iR} < 2\pi$).

Очевидно, що при ударі деформувальної кулі по поверхні деталі кут падіння α_{i1} визначається за такою залежністю (рис. 3):

$$\alpha_{i1} = \beta_{iR} - \varphi_{iR}. \quad (23)$$

Вектор \vec{u}_i (вектор швидкості i -ої деформувальної кулі після удару по деталі) виходить з вектора \vec{v}_i поворотом на кут $\pi - \alpha_{i1} - \alpha_{i2}$ і стиском в K разів [14]:

$$\begin{cases} u_{ix} = -K \dot{x}_{i\dot{e}f} \cdot (\cos(\alpha_{i1} + \alpha_{i2}) + \sin(\alpha_{i1} + \alpha_{i2})) \\ u_{iy} = -K \dot{y}_{i\dot{e}f} \cdot (\sin(\alpha_{i1} + \alpha_{i2}) + \cos(\alpha_{i1} + \alpha_{i2})) \end{cases} \quad (24)$$

де u_{ix} , u_{iy} – проєкції вектора швидкості i -ої деформувальної кулі після удару по деталі на осі OX і OY.

Кут відбиття α_{i2} з урахуванням (22) визначається за формулою:

$$\alpha_{i2} = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha_{i1}}{K} \right). \quad (25)$$

3. Моделювання руху деформувальної кулі від деталі до магнітної системи інструмента. Після взаємодії з деталлю деформувальна куля переміщається в напрямку до магнітної системи інструмента, та її рух також описується системою рівнянь (21), але з іншими початковими умовами:

$$\begin{cases} x_{i0} = x_{i\dot{e}l} \\ \dot{o}_{i0} = \dot{o}_{i\dot{e}l} \\ \dot{x}_{i0} = u_{ix} \\ \dot{y}_{i0} = u_{iy} \end{cases},$$

де $x_{кн}$, $y_{кн}$ – координати центра деформувальної кулі в кінцевий момент фази руху від деталі до магнітної системи.

При чисельному інтегруванні системи рівнянь (21) слід виконувати умову: $\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \geq R_{\dot{N}} + R_{\dot{O}}$.

Висновки. У роботі розкрито сутність процесу поєднаної обробки деталей магнітно-динамічним розкочуванням і змінним обертовим магнітним полем. Представлена конструкція комбінованого інструмента, що містить деформувальні кулі, вільно встановлені в кільцевій камері, магнітну систему для надання деформувальним кулям робочого руху і пристрій впливу на поверхневий шар феромагнітної деталі змінним магнітним полем. Виконано моделювання процесу поєднаної зміцнювальної обробки, отримана система диференціальних рівнянь, що описують кінематику руху деформувальних куль. Встановлено початкові і кінцеві умови для чисельного інтегрування та визначення кінематичних характеристик деформувальної кулі при різних режимах зміцнювальної обробки. Розглянуто рух деформувальних куль при їх взаємодії з джерелами магнітного поля інструменту, які надають їм робочого руху і з намагніченою поверхнею деталі.

Результати досліджень є основою для розробки системи автоматизованого проектування технології поєднаної обробки МДР і змінним обертовим магнітним полем, визначення виконуваної роботи деформування мікронерівностей і розрахунку значень параметрів мікрорельєфу формованої поверхні.

Список використаної літератури:

1. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения : в 2 т. / М.С. Поляк. – М. : ЛВМ-СКРИПТ, Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 832 с.
2. Поляк М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения : в 2 т. / М.С. Поляк. – М. : ЛВМ-СКРИПТ, Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 688 с.
3. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин : учеб. пособие / Т.Ю. Степанова. – Иваново : Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. – 64 с.
4. Ящерицин П.И. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении / П.И. Ящерицин, А.П. Минаков. – Мн. : Наука и техника, 1986. – 215 с.
5. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др. ; под общ. ред. А.Г. Суслова. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
6. Чистосердов П.С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П.С. Чистосердов. – Мн. : Беларусь, 1977. – 124 с.
7. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М. : Машиностроение, 2002. – 300 с.
8. Таранов А.С. Упрочнение валов методом ППД в ПМП / А.С. Таранов // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 2. – С. 44–45.
9. Довгалева А.М. Классификация инструментов для магнитно-динамического упрочнения / А.М. Довгалева, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков // Вестник Белорусско-Российского ун-та. Машиностроение : науч.-метод. журнал ; редкол.: И.С. Сазонов и др. – Могилев, 2008. – № 2. – С. 30–38.
10. Довгалева А.М. Инструменты для магнитно-динамического упрочнения поверхностей деталей машин / А.М. Довгалева, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа, Д.М. Рыжанков // Вестник Брестского гос. тех. ун-та. – 2009. – № 4. – С. 94–97.
11. Двухрядные магнитно-динамические инструменты / А.М. Довгалева, С.А. Сухоцкий, Д.М. Свирепа и др. // Вестник Гомельского гос. тех. ун-та им. П.О. Сухого. – 2009. – № 2. – С. 12–20.
12. Математическое моделирование магнитно-динамического инструмента для упрочняющей обработки плоских поверхностей / А.М. Довгалева, Н.А. Леванович, С.А. Сухоцкий и др. // Вестник Белорусско-Российского ун-та. Машиностроение ; редкол. : И.С. Сазонов и др. – Могилев, 2010. – № 4. – С. 55–65.
13. Способ поверхностного пластического деформирования и инструмент для его осуществления : пат. 2089373 Рос. Федерации, МКИ6 В24 В39/02 / А.М. Довгалева (РБ). – № 4924841/02; заявл. 05.04.91; опубл. 10.09.97; Бюл. № 25. – 14 с.

14. Довгалева А.М. Математическое моделирование процесса магнитно-динамического раскатывания / А.М. Довгалева, И.И. Маковецкий, Д.М. Свирина // Вестник Брестского гос. тех. ун-та. – 2010. – № 4. – С. 26–30.
15. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Под ред. Дж.Холл, Дж.Уатт. – М. : Мир, 1979. – 312 с.
16. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Ч. II. Динамика / А.А. Яблонский. – М. : Высшая школа, 1966. – 411 с.

ШЕЛЕГ Валерій Костянтинович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування" Білоруського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– питання теорії та практики в області технології машинобудування, порошкової металургії, зварювання, композиційних матеріалів і нанотехнологій.

Тел.: (017)292–74–54.

ДОВГАЛЬОВ Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Металорізальні верстати та інструменти" Білорусько-Російського університету.

Наукові інтереси:

– технології оздоблювальної обробки, яка зміцнює поверхні деталей машин;
– технології оздоблювальної обробки, яка зміцнює поверхні деталей деформувальними кулями з використанням енергії магнітного поля.

Тел.: (0222)28–47–41.

ЖОЛОбОВ Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, професор кафедри "Технології машинобудування" Білорусько-Російського університету.

Наукові інтереси:

– прогнозування і забезпечення якості технологічних систем на етапах їх проектування та виготовлення.

Тел.: (0222)23–04–51.

ЛЕВАНОВИЧ Микола Андрійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Теоретичної механіки" Білорусько-Російського університету.

Наукові інтереси:

– дослідження ударних процесів;
– прискорені випробування зубчастих передач.

Тел.: (0222)24–41–59.

КИРИЛОВИЧ Валерій Анатолійович – кандидат технічних наук, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами та комп'ютерних технологій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– автоматизація технологічної підготовки виробництва приладо- та машинобудування.

Тел.: (093)77–030–77.

E-mail: kiril_va@yahoo.com

Стаття надійшла до редакції 26.09.2013