

УДК 621.9.048

**М. Калмиков**

Канд. техн. наук

**В. Кузнєцов**

Інженер

**О. Романченко**

Аспірант

Східноукраїнський  
національний університет імені  
Володимира Даля,  
м. Луганськ

## ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ВПЛИВУ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ ПРИ ВІБРОЗМІЦНЮВАННІ

*Запропоновано метод підвищення інтенсифікації впливу робочого середовища на поверхню, що оброблюється, заснований на використанні додаткового джерела силового впливу на робоче середовище, яким є система котушок, які живляться імпульсами струму. У статті розглянута конструкція системи вібраційного оброблення з пристроєм додаткового силового впливу та методика його розрахунку з використанням синтезу магнітного поля.*

**вібраційне оброблення, кулька, магнітне поле**

Зміцнення поверхні деталей віброобробленням характеризується малим впливом робочого середовища з феромагнітних кульок діаметром 6 — 12 мм на оброблювану поверхню. При одноразовому ударі кульки по поверхні деталі залишається западина, вимірювана десятками мікронів [1], тому процес віброзміцнення займає багато часу (160 — 240 хв), а, отже, й електроенергії.

Особливістю віброзміцнення є також те, що при досягненні визначеного рівня мікротвердості поверхні й товщини зміцненого шару подальше віброоброблення погіршує якість поверхні, що зміцнюється, і починається процес знеміцнення. У літературних джерелах немає відомостей про контроль якості зміцненого шару безпосередньо під час оброблення, тому в цій статті пропонується метод підвищення інтенсивності впливу робочого середовища на поверхні деталі при віброзміцненні.

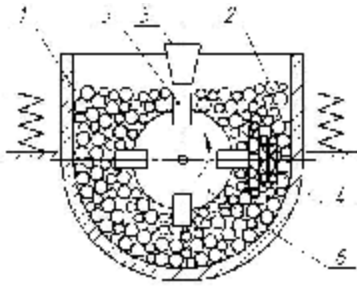
Для інтенсифікації впливу робочого середовища на поверхню, що оброблюється, відомі лише такі способи [2]: закріплення деталей, що оброблюються, у контейнері; притискання робочого середовища; збільшення пришвидження  $A\omega^2$  ( $A$ ,  $\omega$  — амплітуда і кутова частота коливань кульок). Перші два методи збільшують інтенсивність

оброблення не більше, ніж на 10 — 18 %, останній метод має технічні й енергетичні обмеження.

Запропонований нижче метод заснований на використанні додаткового джерела силового впливу на робоче середовище, яким є система котушок, що живляться імпульсами струму. Це джерело на два порядки збільшує величину силового імпульсу робочого середовища на поверхню, що оброблюється. Використання цього методу вимагає постійного контролю стану структури поверхні, що оброблюється, без переривання технологічного процесу, бо зміна структури поверхневого шару металу відбувається в короткий проміжок часу. Теоретичні й практичні аспекти запропонованого методу розглянуті нижче.

**Конструкція системи віброоброблення.** Спрощена конструкція віброуючого контейнера 1 з розміщеними у ньому обіймою 6 і закріпленими в ній деталями 3 показана на рис. 1. У контейнері 1 безпосередньо в робочому середовищі 2 розміщений пристрій додаткового силового впливу (ПДСВ) 4. У верхній частині контейнера є вимірювальний перетворювач приладу контролю поверхні деталі 5.

Обійма із закріпленими в ній деталями обертається зі швидкістю меншою, ніж швидкість циркуляційного



**Рис. 1.** Спрощена конструкція віброуючого контейнера, пристрою додаткового силового впливу (ПДСВ) і пристрою контролю поверхні: 1 — контейнер, 2 — робоче середовище, 3 — деталь, що оброблюється, 4 — ПДСВ, 5 — вимірювальний перетворювач приладу контролю поверхні, що оброблюється, 6 — обойма для закріплення деталей

руху робочого середовища. Оброблення ведеться торцевої поверхні деталі. При потраплянні деталі в зону дії ПДСВ у його обмотки подається імпульс струму амплітудою до  $5 \cdot 10^3$  А, що створює короточасне сильне магнітне поле (0,1 — 0,3 Тл) визначеної топографії. Під дією магнітного поля відбувається удар кульок по поверхні деталі, що оброблюється, і зміцнення поверхневого шару металу. За час перебування деталі в зоні дії ПДСВ відбувається кілька ударів, що значно пришвидшує весь процес віброзміцнення поверхні деталі. При інших положеннях у контейнері, обумовлених кутом повороту барабана, відбувається оброблення деталей у звичайному режимі.

Контроль поверхні деталі здійснюється тоді, коли вона виходить з робочого середовища. Контроль мікротвердості і товщини шару, що зміцнюється, здійснюється електромагнітним методом.

**Пристрій додаткового силового впливу і його розрахунок.** Конструктивно ПДСВ (рис. 2) являє собою котушку, що складається з трьох секцій прямокутної форми. Кожна секція містить 1 — 3 провідники, виконаних з мідної шини прямокутного перерізу. Секції котушки мають однакові геометричні розміри  $2a \times 2c$ . Секції котушки живляться серією імпульсів струму тривалістю 0,02 с і амплітудою до  $8 \cdot 10^5$  А.

На кульку діаметром  $D$ , поміщену в магнітне поле, діє сила [3]

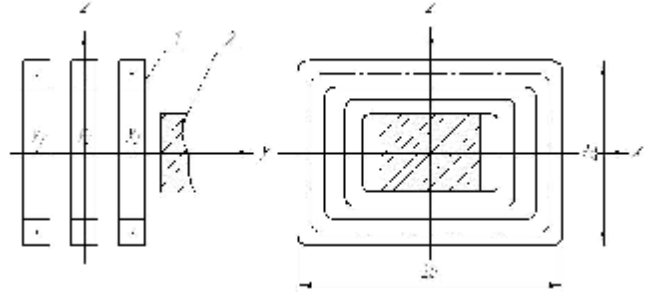
$$\bar{F} = \frac{\mu_0 \pi D^3}{3} H \text{grad} H \approx \mu_0 D^3 H \text{grad} H, \quad (1)$$

де  $D$  — діаметр кульки;  $H$  — модуль напруженості магнітного поля;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

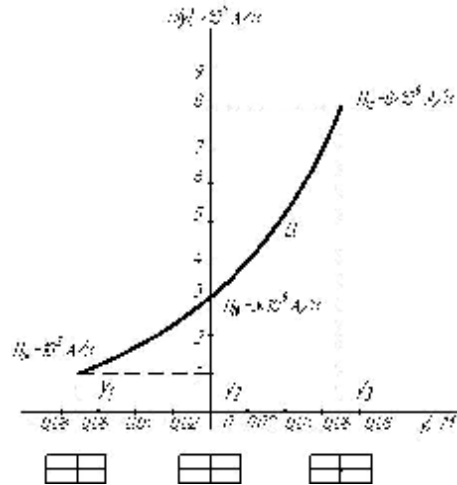
Покладається, що магнітна сприйнятливості кульки дорівнює 2. Якщо діаметр кульок 8 — 12 мм, то

$$\frac{\mu_0 \pi D^3}{3} \approx 10^{-12} \text{ Гн} \cdot \text{м}^2. \text{ Тому для створення сили } F=10 \text{ Н,}$$

величина  $H \text{grad} H$  в імпульсі повинна бути не меншою за  $10^{13} \text{ А}^2/\text{м}^3$ . Для забезпечення працездатності ПДСВ у-складового вектора напруженості магнітного поля повинна залежати від  $y_{\text{max}}$ , як показано графічно на рис. 3. Значення функції  $H(y)$  апроксимується параболою



**Рис. 2.** Конструкція ПДСВ: 1 — секція котушки, 2 — деталь, що оброблюється



**Рис. 3.** Розподіл за координатою у величини у-складової вектора напруженості магнітного поля  $H$

$$H(y) = py^2 + qy + s. \quad (2)$$

Залежність (2) є заданим значенням розподілу напруженості, потрібним для синтезу поля. Задачею синтезу поля є визначення значень струмів у кожній секції котушок, при яких у-складова напруженості магнітного поля змінюватиметься як функція (2).

Позначимо через  $F_0$  зведену силу, що дорівнює

$$F_0 = \frac{F}{\mu_0 V},$$

де  $V$  — об'єм кульки.

Відповідно до (1) і (2)  $F_0(y)$  матиме вигляд

$$F_0 = H \text{grad} H = 2p^2 y^3 + 3pqy^2 + (q^2 + 2ps)y + qS. \quad (3)$$

Об'єм контейнера заповнюється кульками і гранулами поліетилену. Це дає можливість зменшити силу опору рухові кульок. Сила опору рухові кульок можна розрахувати за формулою [4]

$$F_c = m\gamma V, \quad (4)$$

де  $m$  — маса кульки;  $\gamma$  — коефіцієнт опору середовища;  $V$  — швидкість переміщення кульок.

Коефіцієнт  $\gamma$  був установлений дослідним шляхом для різних сипких середовищ [1], і його чисельні значення знаходяться в межах 90 — 150, для заданого робочого середовища  $\gamma=130$ . Згідно з (4) величина мінімальної питомої сили, достатньої тільки для переміщення кульок у робочому середовищі, повинна бути рівної

$$F_{0min} = \frac{\gamma \pi D^3 \rho}{6},$$

де  $\rho$  — густина матеріалу кульок ( $\rho=7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

Якщо не враховувати інерційну силу, рівну

$$F = m \frac{d^2 y}{dt^2},$$

яка нехтовно менша за силу опору рухові кульки  $F_0$ , то остання повинна зрівноважуватися прикладеною пондеромоторною силою. У результаті цього маємо диференціальне рівняння

$$2p^2 y^3 + 3pqy^2 + (q^2 + 2ps)y + qS = \gamma \rho \frac{\pi D^3}{6} \frac{dy}{dt}, \quad (5)$$

з якого випливає, що швидкість переміщення кульки є функцією координати  $y$  і дорівнює

$$V = \frac{6}{\gamma \rho \pi D^3} \left[ 2p^2 y^3 + 3pqy^2 + (q^2 + 2ps)y + qS \right]. \quad (6)$$

Таким чином, при заданому розподілі напруженості магнітного поля швидкість руху кульки по мірі руху в котушці наростає і досягає максимуму в момент контакту з поверхнею деталі, що оброблюється.

Створити потрібну топографію магнітного поля можна шляхом синтезу котушки зі струмом. Задача синтезу формується так [5]. В об'ємі котушки потрібно створити поле,  $y$ -складова якого залежить від  $y$ , як  $H(y) = py^2 + qy + s$ . Поле генерується нескінченно тонкими провідниками прямокутної форми, що утворюють секції. Задача синтезу зводиться до визначення струму в кожній секції, при якому реалізується заданий розподіл магнітного поля.

Вид синтезованої котушки показаний на рис. 4. Котушка складається з трьох секцій, для кожної секції електроживлення окреме.

Напруженість магнітного поля ( $y$ -складова) розраховується за формулою Біо-Савара-Лапласа. Вона дорівнюватиме для однієї секції зі струмом  $I=1A$  в точці спостереження з координатами  $x, y, z$  [5]:

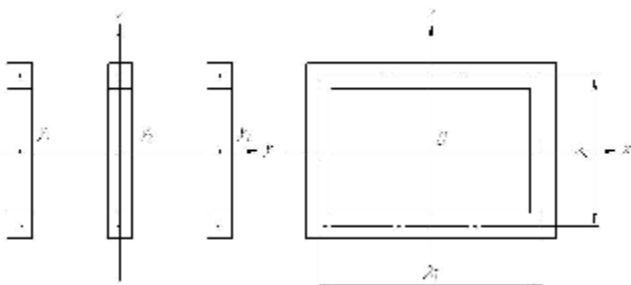


Рис. 4. Загальний вигляд синтезованої котушки

$$H_j(y) = \frac{1}{4\pi} \left[ \begin{aligned} & \frac{z-c}{(y-y_j)^2+c^2} \left( \frac{x-a}{r_{2j}} - \frac{x+a}{r_{1j}} \right) + \\ & + \frac{x-a}{a^2+(y-y_j)^2} \left( \frac{z-c}{r_{2j}} - \frac{z+c}{r_{3j}} \right) + \\ & + \frac{z-c}{(y-y_j)^2+c^2} \left( \frac{x+a}{r_{4j}} - \frac{x-a}{r_{3j}} \right) + \\ & + \frac{x-a}{a^2+(y-y_j)^2} \left( \frac{z+c}{r_{4j}} - \frac{z-c}{r_{1j}} \right) \end{aligned} \right], \quad (7)$$

$$\text{де } r_{1j} = \sqrt{(x+a)^2 + (y-y_j)^2 + (z-c)^2};$$

$$r_{2j} = \sqrt{(x-a)^2 + (y-y_j)^2 + (z-c)^2};$$

$$r_{3j} = \sqrt{(x-a)^2 + (y-y_j)^2 + (z+c)^2};$$

$$r_{4j} = \sqrt{(x+a)^2 + (y-y_j)^2 + (z+c)^2}; \quad y_j=y_1, y_2, y_3.$$

Якщо магнітне поле розглядається на осі котушки, то формула (7) спрощується і набуває вигляду

$$H_{jl} = \frac{ac}{\pi \sqrt{a^2 + (y-y_j)^2 + c^2}} \times \left( \frac{1}{c^2 + (y-y_j)^2} + \frac{1}{a^2 + (y-y_j)^2} \right), \quad (8)$$

де  $j=1, 2, 3$ .

У точці  $i$  всіма трьома секціями створюється напруженість поля

$$H_i = \sum_{j=1}^3 H_j. \quad (9)$$

Струми в секціях визначаються з умови [5]

$$\left\| H_0(y) - \sum_{j=1}^3 I_j H_j(y) \right\| = \min, \quad (10)$$

де  $H_0$  — значення заданої напруженості магнітного поля. Тут норма розуміється в значенні норми в лінійному Гільбертовому просторі. Задача синтезу приводить до розкладання по неортогональній системі функцій  $H_j(y)$ . Тому (10) зводиться до спільної системи лінійних алгебричних рівнянь

$$\sum_{j=1}^3 (H_j H_k) I_j = (H_0 H_k), \quad (11)$$

де  $k=1, 2, 3$ .

Система рівнянь (11) у розгорнутому вигляді подана нижче і розв'язується відносно невідомих струмів  $I_j$ :

$$\begin{pmatrix} \dot{H}_1 \dot{H}_1 \\ \dot{H}_1 \dot{H}_2 \\ \dot{H}_1 \dot{H}_3 \\ \dot{H}_2 \dot{H}_1 \\ \dot{H}_2 \dot{H}_2 \\ \dot{H}_2 \dot{H}_3 \\ \dot{H}_3 \dot{H}_1 \\ \dot{H}_3 \dot{H}_2 \\ \dot{H}_3 \dot{H}_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_1 H_{10} \\ H_2 H_{20} \\ H_3 H_{30} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

**Результати розрахунку ПДСВ.** За викладеною методикою була розрахована магнітна система ПДСВ, що містила три секції. Розміри кожної секції є такими:  $a=8 \cdot 10^{-2}$  м;  $c=8 \cdot 10^{-2}$  м;  $y_1=-0,07$  м;  $y_2=0$ ;  $y_3=0,07$  м. Параметри синтезованого поля рівні  $H_{10}=10^5$  А/м;  $H_{20}=2 \cdot 10^5$  А/м;  $H_{30}=8 \cdot 10^5$  А/м. У результаті синтезу отримані такі значення струму в обмотках секцій:  $I_1=3 \cdot 10^4$  А;  $I_2=8,6 \cdot 10^4$  А;  $I_3=2,5 \cdot 10^5$  А. Розбіжність між заданими параметрами магнітного поля й отриманими в результаті синтезу не перевищують 1,4 %.

### Література

1. *Копылов Ю.Р.* Виброударное упрочнение: Монография. — Воронеж: Воронежский институт МВД России, 1999. — 386 с.
2. *Карташов И.Н., Шаинский М.Е.* Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах. — К.: Высш. шк., 1975. — 179 с.

3. *Лубенская Л.М., Яковенко В.В., Ясуник С.Н.* К расчету электромагнитных вибровозбудителей с распределенным магнитным полем // Вибрация в технике и технологиях. — 2003. — №1(27). — С. 59—60.

4. *Загурняк М.В., Бранстиз Ю.А.* Расчет пондеромоторных сил железоотделителей с ферромагнитными шунтами // Горный журнал. — 1981. — №7. — С. 117—121.

5. *Стадник И.П.* Улучшение сходимости итерационного процесса разложения по неортогональной системе в применении к синтезу катушки прямоугольного сечения по заданному магнитному полю в объеме // Электро-механика. — 1984. — №7. — С. 5—11.

Отримана 14.05.09

*M. Kalmikov, V.Kuznecov, A. Romanchenko*  
**Increase of intensity of influencing of an actuating medium on a surface of a part at vibrational hardening**  
*East Ukrainian National University of Vladimir Dal, Lugansk*

*The method of increase of intensification of influencing of an actuating medium on a surface is offered, which one is processed, grounded on usage of a padding source of power influencing on an actuating medium, which one is the system of coils, which one feed on current pulses. In the article the design of a system of vibrational processing with the device of padding power influencing and technique of his calculation with usage of synthesizing of a magnetic field is esteemed.*

²í ôîðì àö³ÿ

## ТРЕТЯ МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ З НЕЛІНЕЙНОЇ ДИНАМІКИ

Україна, м. Харків, 21 — 24 вересня 2010 р.

### Тематика конференції:

- Аналітичні і числові методи нелінійної динаміки
- Резонанси, стійкість і біфуркації в нелінійних системах
- Нелінійні нормальні форми коливань
- Перехідні процеси і локалізація енергії в нелінійних системах
- Хаотична динаміка
- Нелінійна динаміка розподілених систем, зокрема, пластин і оболонок
- Віброударні системи та інші негладкі системи
- Нелінійна динаміка структур і машин та інші проблеми нелінійної механіки й інженерних застосувань

У рамках конференції відбудеться мінісимпозіум  
**«Повзучість і пластичність при циклічному навантаженні»**

### Адреса оргкомітету:

Інженерно-фізичний факультет,  
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
 вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, Україна.  
 Телефон: +(38)-057-7076032; Факс: +(38)-057-7706601.  
 Інтернет-сайт конференції: [http://kpispu.org.ua/en/ND2010\\_conference](http://kpispu.org.ua/en/ND2010_conference)