

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-272-2-46-51>

УДК 624.9.048

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МАТЕРІАЛУ ДЕТАЛІ ПРИ ОЗДОБЛЮВАЛЬНО-ЗАЧИЩУВАЛЬНІЙ ОБРОБЦІ МЕТАЛЕВИМИ КУЛЬКАМИ НА ОПЕРАЦІЇ ВІБРОПОЛІРУВАННЯ

Міцик А.В.

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE DEFORMATION OF THE PART MATERIAL SURFACE LAYER DURING ITS FINISHING AND GRINDING PROCESSING WITH METAL BALLS IN THE VIBRATION POLISHING OPERATION

Mitsyk A.V.

Відзначено, що на операціях віброполірування у якості робочого середовища використовуються металеві поліровані кульки діаметром 4...6 мм, виконані для шарикопідшипникової промисловості зі сталі ШХ15. Описано сутність операції віброполірування та зазначено, що на поверхневому шарі оброблюваної деталі створюється ефект наклепу. Відзначено, що для створення наклепу широко застосовуються такі технологічні способи, як обдування дробом, карбування та ін., в яких використовуються металеві поліровані кульки, твердість яких значно перевищує твердість матеріалу оброблюваної деталі. Відомо, що наклеп утворюється при пластичній деформації поверхневого шару матеріалу деталі. Пластична контактна задача на практиці віброобробки вирішена ще повністю, хоча отримано її часткові рішення. Метою статті є спроба визначення деформованого стану в зоні деформації за умови пластичного контакту металевої кульки робочого середовища та поверхні оброблюваної деталі. Розроблено математичну модель визначення деформації поверхневого шару матеріалу деталі. Дослідження деформації умовно прийняті у циліндричній системі координат. Поставлене завдання вирішується з використанням засад механіки суцільних середовищ та поля швидкостей переміщень. За розмірами пластичного відбитка знайдено глибину наклепу. Також за допомогою методу лінії ковзання, без урахування сил тертя, встановлено зону поширення деформації у радіальному напрямку. Встановлено поле швидкостей течії металу в зоні деформації. Визначено швидкості деформації, а також встановлено інтенсивність цих швидкостей під час деформації в металі оброблюваної деталі. Прийнято, що область деформації змінюється у просторі та часі. Встановлено, що час початку деформації для кожної точки поверхні оброблюваної деталі матиме значення. Доведено, що вогнище деформації можна обмежити еліптичною поверхнею. Отримано вираз у циліндричних координатах, що дозволяє визначити інтенсивність деформації поверхні оброблюваної деталі металевими кульками у будь-який момент часу циклу операції вібраційної оздоблювально-зачищувальної обробки.

Ключові слова: операція віброполірування, поліровані металеві кульки, наклеп, зона деформації,

швидкість руху кульки, поле швидкостей, інтенсивність швидкостей, інтенсивність деформації.

Вступ. Останнім часом на металообробних підприємствах поширена технологія обробки поверхонь деталей методом віброполірування. У якості вільного оброблювального середовища, що завантажується в резервуар віброверстата, при цьому, як правило, використовуються металеві поліровані кульки діаметром 4...6 мм, виконані для шарикопідшипникової промисловості зі сталі ШХ-15 ГОСТ 3772-81. Ці технології докладно описані класиками методу віброобробки [1, 2].

Сутність операції віброполірування. При операції віброполірування на поверхневому шарі оброблюваної деталі створюється ефект наклепу [3, 4]. Для створення наклепу також широко застосовуються такі технологічні способи, як обдування дробом, карбування та ін., у яких використовується інструмент зі сферичною поверхнею, зокрема металеві поліровані кульки, твердість яких значно перевищує твердість матеріалу оброблюваної деталі [5 – 8].

Відомо, що наклеп утворюється внаслідок пластичної деформації поверхневого шару матеріалу деталі [9]. Пластична контактна задача нині повністю не вирішена, хоча рядом дослідників отримано важливі результати, які дозволяють досягти її часткових рішень.

Метою роботи є спроба визначити деформований стан у зоні деформації за умов пластичного контакту металевої кульки робочого середовища та деформованого напівпростору на поверхні оброблюваної деталі з використанням окремих апіорних результатів [10].

Розробка математичної моделі. Умовно приймемо дослідження деформації у циліндричній системі координат (рис. 1).

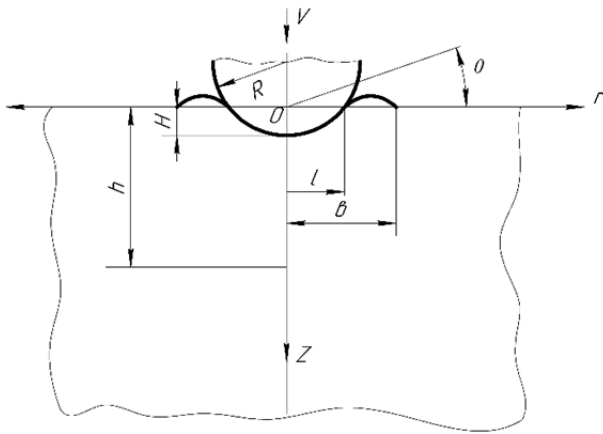


Рис. 1. Схема деформації поверхні в зоні контакту металеві кульки та деталі на операції віброполірування

Поставлену задачу вирішуватимемо з використанням загальних рівнянь механіки суцільних середовищ та поля швидкостей переміщення [11]. Деформований стан знаходимо за умови, що відомо поле швидкостей гранул робочого середовища в вогнищі деформації, гранули якого визначаємо з робіт [12, 13]. Глибину наклепу за розмірами пластичного відбитка знайдемо за формулою (1):

$$h \approx kl, \tag{1}$$

де k – коефіцієнт при степені наклепу, менше ніж 0,5, приблизно дорівнює 3; l – розмір зони впровадження кульки робочого середовища у радіальному напрямку.

Зону поширення деформації в радіальному напрямку, знайдену за допомогою методу ліній ковзання без урахування сил тертя, визначимо з рівності [13]:

$$b = 2l. \tag{2}$$

Можна прийняти гіпотезу, що в силу осової симетрії процесу та відсутності скручування та перекосів у процесі деформації тангенціальна складова швидкості дорівнює нулю, тобто $V_\theta = 0$.

Вертикальну складову V_z представляємо у вигляді творів двох функцій, кожна з яких залежить лише від одного аргументу:

$$V_z = f(r) \varphi(z), \tag{3}$$

де $f(r)$ – функція, що характеризує закон зміни руху частинок металу за координатою r , визначається формою гранули робочого середовища, зоною поширення деформації та формою гребінця навколо лунки, що може бути записано у вигляді:

$$f(r) = V_0 \frac{l}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{l}. \tag{4}$$

Через те, що при глибині проникнення гранули робочого середовища, тобто металеві кульки, $H < 0,3R$ то $l \approx \sqrt{2RH}$. Разом з тим, коли $H = V_0 t$, отримаємо $l = \sqrt{2RV_0 t}$.

Тепер вираз (4) набуде виду:

$$f(r) = \frac{V_0 \sqrt{2RV_0 t}}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0 t}}, \tag{5}$$

де t – час деформування; V_0 – швидкість руху кульки робочого середовища.

Функція $\varphi(z)$ характеризує закон згасання за координатою z . На підставі експериментальних досліджень розподілу деформацій за глибиною методом мікротвердості та з урахуванням рівняння (1) ця функція може бути представлена у виді:

$$\varphi(z) = \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0 t}} \right)^2. \tag{6}$$

Складову швидкості V_z визначаємо з рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_r}{r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \tag{7}$$

Поле швидкостей течії металу в зоні деформації має наступний вид:

$$\begin{aligned} V_z &= V_0 \frac{\sqrt{2RV_0 t}}{\pi r} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0 t}} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0 t}} \right)^2; \\ V_r &= 2V_0 \frac{\sqrt{2RV_0 t}}{\pi^2 k r} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0 t}} \right) \times \\ &\quad \times \left(1 - \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0 t}} \right); \\ V_\theta &= 0. \end{aligned} \tag{8}$$

Визначення швидкостей деформації та їх інтенсивності в металі оброблюваної деталі. Знаючи поле швидкостей переміщень матеріальних частинок, визначаємо швидкості деформацій згідно з диференціальними співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial V_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{rr} = \frac{\partial V_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{V_r}{r}; \\ \varepsilon_{zr} &= \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z}; \quad \varepsilon_{r\theta} = 0; \quad \varepsilon_{\theta z} = 0. \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{zz} &= -\frac{2V_0}{\pi V_r} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0t}} \right) \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}}; \\
\varepsilon_{rr} &= -\frac{2V_0\sqrt{2RV_0t}}{\pi^2 k r^2} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0t}} \right) \left(1 - \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right); \\
\varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{2V_0\sqrt{2RV_0t}}{\pi^2 k r^2} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0t}} \right) \left(1 - \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right); \\
\varepsilon_{zr} &= \frac{V_0\sqrt{2RV_0t}}{\pi r^2} \left(1 - \frac{z}{k\sqrt{2RV_0t}} \right)^2 \left(\frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right) - \frac{2V_0}{\pi^2 k^2 r} \left(1 - \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right); \\
\varepsilon_{r\theta} &= 0; \quad \varepsilon_{\theta z} = 0.
\end{aligned} \tag{10}$$

Використовуючи рівняння (8) і роблячи зазначені у співвідношеннях (9) дії, отримуємо наступні вирази для швидкостей деформацій (10).

Далі визначаємо інтенсивність швидкостей деформації в металі оброблюваної деталі.

Інтенсивність швидкостей деформації можна визначити, використовуючи вираз, який у цьому випадку має вид:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2 + \frac{3}{2} \varepsilon_{zr}^2} \tag{11}$$

Визначення складових деформації у матеріалі оброблюваної деталі. Складові деформації зазвичай визначаються через складові швидкостей деформації:

$$\begin{aligned}
e_{zz} &= \int_{t_0}^t \varepsilon_{zz} dt; \quad e_{rr} = \int_{t_0}^t \varepsilon_{rr} dt; \quad e_{\theta\theta} = \int_{t_0}^t \varepsilon_{\theta\theta} dt; \\
e_{zr} &= \int_{t_0}^t \varepsilon_{zr} dt; \quad e_{r\theta} = 0; \quad e_{\theta z} = 0.
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
e_{zz} &= \frac{\sqrt{2RV_0t}(2z - k\sqrt{2RV_0t})}{\pi k^2 r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \frac{\sqrt{2RV_0t}}{kR} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \\
&- \frac{\pi r}{kR} \int_{t_0}^t \frac{\sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}{\left(\sqrt{2RV_0t} \right)^{1/2}} - \frac{2\pi z}{k^2 R} \int_{t_0}^t \frac{\cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}{\left(\sqrt{2RV_0t} \right)^{1/2}} - \\
&- \frac{\sqrt{2RV_0t_0}(2z - k\sqrt{2RV_0t_0})}{\pi k^2 r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}} + \frac{\sqrt{2RV_0t_0}}{kR} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}};
\end{aligned} \tag{15}$$

Через те, що область деформації змінюється у просторі та в часі, то час початку деформації для кожної точки матиме своє значення. Експериментально доведено, що вогнище деформації можна обмежити еліптичною поверхнею з півосями:

$$a = k\sqrt{2RV_0t}; \quad b = 2\sqrt{2RV_0t}. \tag{13}$$

На цій поверхні величина деформації дорівнює нулю, а час початку деформації знайдем із рівняння цієї поверхні:

$$t_0 = \frac{4z^2 + k^2 r^2}{8k^2 RV_0}. \tag{14}$$

В результаті інтегрування виразів у часі отримаємо такі складові її деформації:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} = & \frac{4kRV_0t - 3z\sqrt{2RV_0t}}{3\pi k^2 r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \frac{2\pi^2 k r^2 + 2k(\sqrt{2RV_0t})^3 - 6zRV_0t}{3\pi^3 k^2 r^2 R} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \\ & + \frac{2\pi r}{3kR} \int_{t_0}^t \frac{\sin \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} + \frac{\pi z}{k^2 R} \int_{t_0}^t \frac{\cos \frac{\pi r}{\sqrt{2(RV_0t)^{1/2}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} - \\ & - \frac{2V_0t_0(2k\sqrt{2RV_0t} - 3z)}{3\pi^2 k^2 r^2} - \frac{4kRV_0t_0 - 3z\sqrt{2RV_0t_0}}{3\pi k^2 r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}} + \frac{2V_0t_0(2k\sqrt{2RV_0t} - 3z)}{3\pi^2 k^2 r^2} - \\ & - \frac{2\pi^2 k r^2 \sqrt{2RV_0t_0} + 2k(\sqrt{2RV_0t_0})^3 - 6zRV_0t_0}{3\pi^2 k^2 r^2 R} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}}; \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta\theta} = & \frac{2V_0t(2k(\sqrt{2RV_0t} - 3z))}{3k^2 \pi^2 r^2} + \frac{6zRV_0t + k\pi^2 r^2 \sqrt{2RV_0t} - 2k(\sqrt{2RV_0t})^3}{3k^2 \pi r R} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \\ & + \frac{2kRV_0t - 3z\sqrt{2RV_0t}}{3k^2 \pi r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \frac{2\pi r}{6kR} \int_{t_0}^t \frac{\sin \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} + \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{\pi z}{k^2 R} + \int_{t_0}^t \frac{\cos \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{3/2}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} - \frac{3z2RV_0t_0 + k\pi^2 r^2 \sqrt{2RV_0t_0} - 2k(\sqrt{2RV_0t_0})^3}{3k^2 \pi^2 r^2 R} \times \\ & \times \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}} - \frac{2V_0t_0(2k\sqrt{2RV_0t_0} - 3z)}{3k^2 \pi^2 r^2} - \frac{2kRV_0t_0 - 3z\sqrt{2RV_0t_0}}{3k^2 \pi r R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{zz} = & \frac{(3 + \pi^2 k^2) 2RV_0t - 3k\pi^2 z \sqrt{2RV_0t}}{3k^2 \pi^2 R r} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} - \\ & - \frac{[(3 + \pi^2 k^2) r^2 + 3z^2] \sqrt{2RV_0t} + k^2 (\sqrt{2RV_0t})^3 - 6kzRV_0t}{3\pi k^2 r^2 R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t}} + \\ & + \frac{(3 + \pi^2 k^2) r}{3k^2 R} \int_{t_0}^t \frac{\cos \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{3/2}}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}}}} - \frac{\pi z}{kR} \int_{t_0}^t \frac{\sin \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{1/2}} \left(-\frac{1}{2} \frac{\pi r}{\sqrt{(2RV_0t)^{3/2}}} \right) dt}}{\frac{\pi r}{(\sqrt{2RV_0t})^{1/2}}} - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{2V_0t}{\pi^2 k^2 r} + \frac{2V_0t}{\pi^2 k^2 r} - \frac{(3 + \pi^2 k^2) 2RV_0t_0 - 3k\pi^2 z \sqrt{2RV_0t_0}}{3k^2 \pi^2 Rr} \cos \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}} + \\
& + \frac{\left[(3 + \pi^2 k^2) r^2 + 3z^2 \right] \sqrt{2RV_0t_0} + k^2 (\sqrt{2RV_0t_0})^3 - 6kzRV_0t_0}{3\pi k^2 r^2 R} \sin \frac{\pi r}{\sqrt{2RV_0t_0}}.
\end{aligned} \tag{18}$$

Вираз інтенсивності деформації у матеріалі оброблюваної деталі. Інтенсивність деформації можна визначити з виразу, який у циліндричних координатах має вид:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{rr})^2 + (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{zz})^2} + \frac{3}{2} \varepsilon_{zr}^2. \tag{19}$$

Висновки

Таким чином, використовуючи наведені залежності, можна відтворити просторову картину розподілу деформацій в металі при обробці деталі на операції віброполірування металевими кульками в будь-який момент часу циклу операції вібраційної оздоблювально-зачищувальної обробки.

Література

1. Карташов И.Н., Шаинский М.Е., Власов В.А. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах. Киев: Вища школа, 1975. 188 с.
2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону, 2008. 694 с.
3. Kundrák J., Morgan M., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine's reservoir during a multi-energy finishing-grinding vibration processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106, p. 4339 – 4353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
4. Мицьк А.В., Федорович В.А. Развитие новых технологий вибрационной отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей общемашиностроительного применения. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: нові рішення в сучасних технологіях.* Харків, НТУ «ХПІ», 2012. № 47 (953). С. 226 – 233.
5. Николаенко А.П. Формирование поверхности изделия при вибрационной обработке. *Вібрації в техніці та технологіях.* 2010. № 2 (58). С. 167 – 181.
6. Носко П.Л., Калмыков М.О., Николаенко А.П., Лубенська Л.М. Застосування вібраційної обробки для підвищення якості виробів: монографія. СНУ ім. В. Даля. Луганськ: Ноулідж, 2009. 292 с.
7. Кріль О.С. Методы и процедуры динамики шпиндельных узлов: монография. Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2014. 154 с.
8. Кріль О.С. Параметрическое моделирование металло-режущих станков и инструментов: монография. Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2012. 116 с.
9. Калмыков М.О., Шумакова Т.О., Струтинський В.Б., Лубенська Л.М. Інструмент для обробки деталей вільними абразивами. Київ – Луганськ: «Ноулідж», 2010. 214 с.

10. Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Mitsyk, A.V., Fedorovich, V.A., Kundrák, J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing – grinding treatment in the oscillating reservoir. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70, p. 263 – 276 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
11. Алексеев Ю.Н., Борисевич В.К., Коваленко П.И. Теоретические исследования деформационного состояния при внедрении сферического индентора в полупространство. *Импульсная технология обработки металлов давлением.* Вып. 5. Харьков: ХАИ, 1975. с. 112 – 116.
12. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием. Харьков: ХГУ, 1969. 108 с.
13. Кудрявцев И.В. Основы выбора режима упрочняющего поверхностного наклепа ударным способом. *Повышение долговечности деталей машин методом поверхностного наклепа.* Вып. 108. Москва: Машиностроение, 1965. с. 6 – 35.

References

1. Kartashov I.N., Shainskij M.E., Vlasov V.A. Obrabotka detalej svobodnymi abrazivami v vibriruyushchih rezervuarah. Kiev: Vishcha shkola, 1975. 188 s.
2. Babichev A.P., Babichev I.A. Osnovy vibracionnoj tekhnologii. Rostov-na-Donu, 2008. 694 s.
3. Kundrák J., Morgan M., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. The effect of the shock wave of the oscillating working medium in a vibrating machine's reservoir during a multi-energy finishing-grinding vibration processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106, p. 4339 – 4353 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04844-2>
4. Mitsyk A.V., Fedorovich V.A. Razvitie novyh tekhnologij vibracionnoj otdelochno-zachistnoj i uprochnyayushchej obrabotki detalej obshchemashinostroitelnogo primeneniya. *Visnik NTU «KhPI». Seriya: novi rishennya v suchasnykh tekhnologiyah.* Kharkiv, NTU «KhPI», 2012. № 47 (953). S. 226 – 233.
5. Nikolaenko A.P. Formirovanie poverhnosti izdeliya pri vibracionnoj obrabotke. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiiakh.* 2010. № 2 (58). S. 167 – 181.
6. Nosko P.L., Kalmykov M.O., Nikolaienko A.P., Lubenska L.M. Zastosuvannya vibratsiinoi obrabotky dlia pidvyshchennia yakosti vyrobiv: monohrafiia. SNU im. V. Dalia. Luhansk: Noulidzh, 2009. 292 s.
7. Krol O.S. Metody i procedury dinamiki shpindel'nyh uzlov: monografiya. Lugansk: VNU im. V. Dalia, 2014. 154 s.
8. Krol O.S. Parametricheskoe modelirovanie metallo-rezhuschih stankov i instrumentov: monografiya. Lugansk: SNU im. V. Dalia, 2012. 116 s.
9. Kalmykov M.O., Shumakova T.O., Strutynskiy V.B., Lubenska L.M. Instrument dlia obrabotky detalei vilnymy abrazivamy. Kyiv – Luhansk: «Noulidzh», 2010. 214 s.

10. Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Mitsyk, A.V., Fedorovich, V.A., Kundrák, J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing – grinding treatment in the oscillating reservoir. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 70, p. 263 – 276 (2014). <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
11. Alekseev Yu.N., Borisevich V.K., Kovalenko P.I. Teoreticheskie issledovaniya deformacionnogo sostoyaniya pri vnedrenii sfericheskogo indentora v poluprostranstvo. Impul'snaya tekhnologiya obrabotki metallov davleniem. Vyp. 5. Kharkov: KhAI, 1975. s. 112 – 116.
12. Alekseev Yu.N. Vvedenie v teoriyu obrabotki metallov davleniem, prokatkoj i rezaniem. Kharkov: KhGU, 1969. 108 s.
13. Kudryavcev I.V. Osnovy vybora rezhima uprochnyayushchego poverhnostnogo naklepa udarnym sposobom. Povyshenie dolgovechnosti detalej mashin metodom poverhnostnogo naklepa. Vyp. 108. Moskva: Mashinostroenie, 1965. s. 6 – 35.

Mitsyk A. Mathematical simulation of the deformation of the part material surface layer during its finishing and grinding processing with metal balls in the vibration polishing operation

It is noted that polished metal balls with a diameter of 4...6 mm, made for the ball bearing industry from 100Cr6 (DIN 17230-1980) steel, are used as a working medium in vibration polishing operations. The nature of the vibration polishing operation is described and it is indicated that the effect of surface cold working is created on the surface layer of the processed part. It is noted that such technological methods as blowing with shot, caulking and others are widely used to create work hardening. In this operation the metal polished balls, the hardness of which significantly exceeds the hardness of the material of the processed part, are used. It is known that work hardening is formed during plastic deformation of the part material surface layer. The plastic contact problem in the practice of vibration treatment has not yet been fully solved, but its partial solutions have been obtained. The purpose of

the article is an attempt to determine the state of strain in the deformation zone under the condition of plastic contact between the metal ball of the working medium and the surface of the processed part. A mathematical model has been developed for determining the deformation of the part material surface layer. Deformation studies are conventionally accepted in a cylindrical coordinate system. The problem posed is solved using the general equations of continuum mechanics and the velocity field displacements. The depth of work hardening was determined from the dimensions of the plastic imprint. Also, using the slip line method, without taking into account friction forces, the zone of deformation propagation in the radial direction was established. The field of metal flow velocities in the deformation zone is established. The strain rates are determined, and the intensity of these rates during deformation in the metal of the processed part is established. It is assumed that the deformation zone varies in space and time. It has been established that the start time of deformation for each point of the processed part surface will have its own value. It is proved that the deformation zone can be limited by an elliptical surface. As a result, an expression in cylindrical coordinates is obtained. It allows one to determine the intensity of deformation of the processed part surface by metal balls at any time of the cycle of the vibration finishing and grinding processing.

Keywords: vibration polishing operation, polished metal balls, work hardening, deformation zone, ball motion speed, velocity field, velocity intensity, deformation intensity

Міцик Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк), an.mitsyk@gmail.com

Стаття подана 01.02.2021 р.