

УДК 621.771

Бондаренко Ю. В.  
Белоконь Ю. О.  
Васильченко Т. О.

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ НЕОДНОРІДНОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ОСАДЦІ

Осадка – це процес обробки металів тиском, що полягає у деформації циліндричної або призматичної заготовки між плоскопаралельними бойкам, при якому зменшуються висота та збільшується площа її поперечного перетину.

Деформований стан при осадці відрізняється великою неоднорідністю і залежить від цілого ряду факторів. До найбільш значущих факторів варто віднести: фактор форми (у даному випадку, відношення висоти заготовки до її діаметра або ширини), рівень сил тертя на контакт, нерівномірність структури металу і температурного поля [1, 2].

Метою роботи є дослідження неоднорідності деформації при осадці шляхом математичного моделювання. У випадку циліндричної заготовки поперечні перерізи при відсутності анізотропії тертя зберігають кругову форму, а меридіональні одержують бочкоподібну. Ступінь і характер бочкоподібності залежать від величини сил тертя. Чим вище тертя, тим сильніше гальмування точок, розташованих на торцях, і тим більше за рівних інших умов різниця між діаметрами торців осадженої заготовки і діаметрами інших її перерізів. При цьому у низьких заготовках ( $h_0/d_0 < 1$ ) переріз посередині твірної одержує максимальний діаметр, тобто заготовка відразу набуває бочкоподібної форми, причому ступінь бочкоподібності зменшується при зменшенні фактора форми.

При осадці високих заготовок ( $h_0/d_0 > 2$ ) це явище значно ускладнюється. Як показав Ф. Рідель, зразок із  $h_0/d_0 = 2,86$  при малому ступені деформації набуває форми нібито двох бочок із торцями, з'єднаними циліндричною частиною. При подальшій осадці діаметр циліндричної частини росте, і заготовка одержує форму циліндра, до якого примикають кінці у вигляді усічених конусів. При ще більшій деформації, порядку 40÷50 %, діаметр середнього перерізу росте більш інтенсивно, і заготовка приймає бочкоподібну форму. При відношеннях ( $h_0/d_0 > 2$ ) можна одержати так звану «подвійну бочку», яка при подальшій осадці за рахунок більш інтенсивного збільшення середнього діаметра переходить в одинарну [2].

Глибокі дослідження Я. М. Охріменка [3] показують, що зі збільшенням ступеня деформації бочкоподібність спочатку збільшується, досягаючи максимуму, а потім зменшується. При цьому чим менше початковий фактор форми – тим меншою буде бочкоподібність і при меншому ступені деформації досягається її максимум. Так, наприклад, для зразків з вихідним відношенням  $h_0/d_0 = 2$  максимум бочкоподібності спостерігався при ступені деформації  $\varepsilon = 0,55$ , для низьких зразків з  $h_0/d_0 = 0,25$  – при  $\varepsilon = 0,25$ . Відносна величина максимальної бочкоподібності в низьких зразках більш ніж у 3 рази менше, ніж у високих. Підвищення рівня сил контактного тертя у всіх випадках збільшує бочкоподібність і змінює ступінь деформації, при якій спостерігається максимальна бочкоподібність.

Неоднорідність деформації при осадці викликає накопичення додаткових напружень, що викрапляють основну схему напруженого стану аж до того, що в деяких областях тіла можуть з'явитися розтягаючі напруження. Появі останніх сприяє також розвиток бочкоподібності. Схематично можна представити, що при наявності бочкоподібності у тілі, що осаджується, з'являються немовби дві зони: центральна, що має форму циліндра, і зовнішня – кільцеподібна.

Розглянемо побудову моделі, за допомогою якої можливо провести аналіз нерівномірності деформації при осадці [4]. В якості геометричної моделі представимо осередок деформації у вигляді, показаному на рис. 1.

Побудуємо кінематичне можливе поле швидкостей. Апроксимація радіальної складової швидкості  $\vartheta_r$  з урахуванням бочки дає наступний вираз:

$$\vartheta_r = a \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \cdot \frac{r}{R},$$

де  $a$  – варійований швидкісний коефіцієнт.

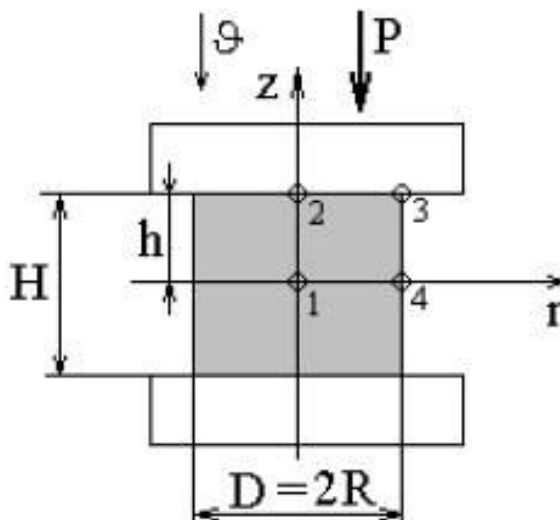


Рис. 1. Осередок деформації при осадці

Тоді складові швидкості деформації запишемо у вигляді:

$$\xi_{rr} = \frac{d\vartheta_r}{dr} = a \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \frac{1}{R}, \quad \xi_{\varphi\varphi} = \frac{\vartheta}{r} = a \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \frac{1}{R}.$$

За умовою нестисливості визначимо складову швидкості  $\vartheta_z$ :

$$\xi_{zz} + \xi_{\varphi\varphi} + \xi_{rr} = 0$$

$$\xi_{zz} = \frac{d\vartheta_z}{dz} = -\frac{2a}{R} \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \rightarrow \vartheta_z = -2a \frac{z}{R} + 2a \frac{z^3}{3h^2 R} + C.$$

Скористаємося граничними умовами (г. у.), в якості яких запишемо

$$\vartheta_z \Big|_{z=0} = 0$$

Отримаємо  $C = 0$ . тоді

$$\vartheta_z = 2a \frac{z}{R} \left( \frac{z^2}{3h^2} - 1 \right).$$

З г. у.  $\vartheta_z \Big|_{z=\pm h} = -\vartheta$  знайдемо варійований параметр  $a = \frac{3}{4} \vartheta \frac{R}{h}$ .

Остаточно поле швидкостей і поле швидкостей деформації запишуться, відповідно,

$$\left\{ \begin{array}{l} \vartheta_z = -\frac{3}{2} \vartheta \frac{z}{h} \left( \frac{z^2}{3h^2} - 1 \right), \\ \vartheta_r = -\frac{3}{4} \vartheta \frac{r}{h} \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right), \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \xi_{zz} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{\vartheta}{h} \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right), \\ \xi_{rr} = \xi_{\varphi\varphi} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\vartheta}{h} \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right), \\ \xi_{rz} = -\frac{3}{2} \cdot \frac{\vartheta z r}{h^3}. \end{array} \right.$$

Інтенсивність швидкостей деформації  $\bar{\xi}$ , за умови, що  $\xi_{rr} = \xi_{\varphi\varphi}$ ,  $\xi_{zz} = -2\xi_{rr}$ ,  $\xi_{\varphi r} = \xi_{\varphi z} = 0$  запишемо у вигляді:

$$\bar{\xi} = 2\sqrt{\xi_{rr}^2 + \xi_{rz}^2},$$

або

$$\bar{\xi} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\vartheta}{h} \sqrt{3 \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) + \frac{4r^2 z^2}{h^4}}.$$

Відомо, що при однорідній осадці ( $\tau = 0$ ) інтенсивність швидкості деформації  $\bar{\xi} = \sqrt{3} \frac{\vartheta}{h}$ , тоді оцінку неоднорідності деформації дає співвідношення

$$\frac{\bar{\xi}}{\xi_0} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{3 \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) + \frac{4r^2 z^2}{h^4}}.$$

Аналіз неоднорідності деформації в характерних точках наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Аналіз неоднорідності деформації в характерних точках

Номер точки	1	2	3	4
Координати $r = 0$	$z = 0$ $r = 0$	$z = h$ $r = R$	$z = h$ $r = R$	$z = 0$
$\frac{\bar{\xi}}{\xi_0}$	1,5	0	$\frac{\sqrt{3} \cdot R}{h}$	1,5

Математичне моделювання процесу здійснювали в програмі Deform. Результати моделювання представлені на рис. 2. Як і очікувалось, зона найбільшої деформації з'являється в середині зразка (точка 1). Напружено-деформований стан в заготовці залежить від тертя на торцях контактних поверхонь та від розмірів заготовки. Сили тертя на контактних поверхнях утворюють у деформуємому тілі схему об'ємно-напруженого стану та впливають на характер розподілу деформацій як в осьовому, так і в радіальному напрямках.

Наявність наведених вище зон підтверджується експериментальними дослідженнями, проведеними різними методами: осадкою багат шарових зразків (Е. Зібель та ін.), осадкою зразків з координатною сіткою (Ф. Кік та ін.), мікроструктурами методом (Г. О. Смірнов-Аляєв) та ін.[1].

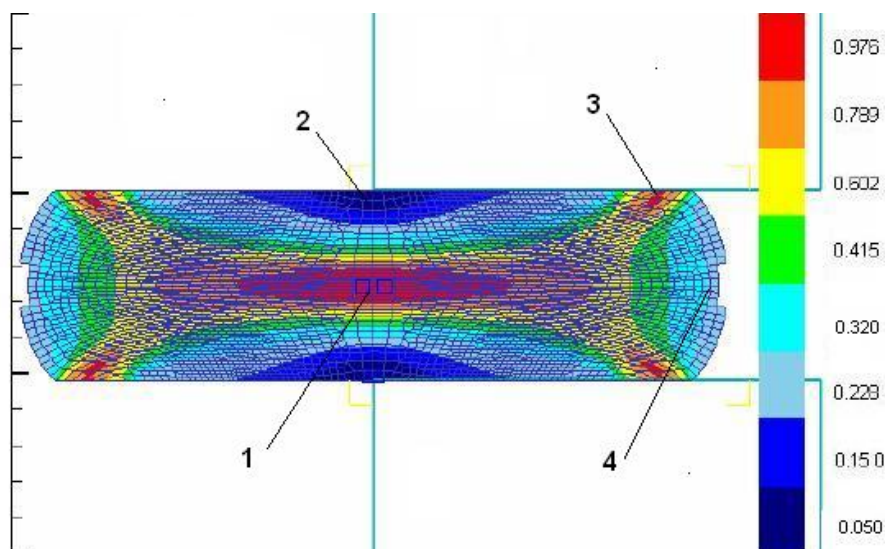


Рис. 2. Розподіл деформацій при моделюванні в Deform

### ВИСНОВОК

Результати розрахунку показують, що найбільш впливовим фактором є ступінь деформації: зі збільшенням ступінь деформації нерівномірність деформації знижується. Наступною за впливом є геометрія заготовки: зі збільшенням фактора  $h/d$  рівномірність збільшується. Шляхом розрахунків встановлено, що найбільш інтенсивна деформація реалізується в точці 1, а в точці 3 неоднорідність деформації залежить від співвідношення  $R/h$  або  $D/H$ .

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Данченко В. М. Теорія процесів обробки металів тиском / В. М. Данченко, В. О. Гринкевич, О. М. Головка. – Дніпропетровськ : Пороги, 2008. – 370 с.
2. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1971. – 424 с.
3. Охрименко Я. М. Теория процессов ковки / Я. М. Охрименко, В. А. Тюрин. – М. : Машиностроение, 1977. – 295 с.
4. Теория и технология ковки / Л. Н. Соколов, Н. К. Голубятников, В. Н. Ефимов, И. П. Шелаев. – К. : Вища школа, 1989. – 317 с.

### REFERENCES

1. Danchenko V. M. Teoriya processiv obrobki metaliv tiskom / V. M. Danchenko, V. O. Grinkevich, O. M. Gokovko. – Dnipropetrovsk : Porogi, 2008. – 370 s.
2. Storogev M. V. Teoriya obrabotki metallov davleniev / M. V. Storogev, E. A. Popov. – M. : Mashinostroenie, 1971. – 424 s.
3. Ohrimenko Y. M. Teoriya processov kovki / Y. M. Ohrimenko, V. A. Turin. – M. : Mashinostroenie, 1977. – 295 s.
4. Teoriya i tehnologiya kovki / L. N. Sokolov, N. K. Golybyatnikov, V. N. Efimov, I. P. Shelaev. – K. : Visha shkola, 1989. – 317 s.

Бондаренко Ю. В. – канд. техн. наук., доц. ЗДІА  
 Белоконь Ю. О. – канд. техн. наук., доц. ЗДІА  
 Васильченко Т. О. – ст. викладач ЗДІА

ЗДІА – Запорізька державна інженерна академія.

E-mail: bond.1984@mail.ru, belokonura@rambler.ru, pepipp@mail.ru