

О.В. Сердюк, І.О. Сивак, М.А. Карватко  
Вінницький національний технічний університет

### НАРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН В ОСЕРЕДКУ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ ВДАВЛЮВАННІ ТОРОЇДАЛЬНОГО РОЛИКА

*Виконано аналіз напружено-деформованого стану в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика в циліндричну поверхню. Установлено вплив геометричних характеристик залишкової вм'ятини на характер розподілу напружень в поверхневому шарі металу. Проведено експериментальну перевірку оптимальних результатів методом мікротвердості.*

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, вдавлювання, геометричні характеристики, поверхневий шар металу, тороїдальний ролик.

Однією із важливих задач при виготовленні деталей є забезпечення високої якості робочих поверхонь і покращення фізико-механічних характеристик поверхневого шару їх матеріалу. Одним із найбільш економічних та ефективних шляхів вирішення цієї проблеми є зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД), яке дозволяє повніше реалізувати потенційні властивості конструкційних матеріалів в реальних деталях складної будови та в деталях з концентраторами напружень [1, 2].

При розгляді процесу ППД, зокрема при деформуванні роликом циліндричної поверхні виникає цілий ряд задач. Однією з них є визначення характеристик зони контакту інструмента та деталі та визначення напружено-деформованого стану в осередку деформації і, в подальшому, використаного ресурсу пластичності в поверхневому шарі. Вирішенням цієї задачі займалися Афонін А.Н. [1], Блюменштейн В.Ю. [2], Дрозд М.С. [3], Кірічек А.В. [1, 4], Матлін М.М. [3, 5], Отеній Я.Н. [7], Саушкін М.Н. [8], Сідякин Ю.І. [9], Смелянский В.М. [10].

Метою дослідження є вивчення впливу геометричних характеристик залишкової вм'ятини на характер розподілу напружень в поверхневому шарі металу.

Контур залишкової вм'ятини на поверхні деталі в загальному випадку обмежений залишковою просторовою кривою, яка має в плані еліптичну форму з великою,  $a$ , і малою  $b$ , полуосями. Геометричні параметри залишкової вм'ятини є важливими характеристиками деформованого стану матеріалу в контакті. При обкочуванні деталей роликами один із розмірів відбитку практично дорівнює ширині бігової доріжки робочого інструменту і визначає протікання процесу хвилеутворення на оброблюваній поверхні і відповідно її мікрорельєф. Розміри полуосей  $a$  і  $b$  характеризують також глибину пластично деформованої зони в області контакту.

В роботі [3] приведені наступні формули для розрахунків розмірів великої  $a$  і малої  $b$ , полуосей еліпса (рис. 1.)

$$a = \sqrt{R_{11}(2 \cdot h_a + \alpha_y) - h_a^2}; \quad (1)$$

$$b = \sqrt{R_{21}(2 \cdot h_b + \alpha_y) - h_b^2}, \quad (2)$$

де  $R_{11}, R_{21}$  - радіуси кривизни (в головних площинах) робочої поверхні ролика (для кульки  $R_{11} = R_{21}$ );

$2a$  і  $2b$  - велика і мала осі контуру (в плані) залишкової вм'ятини;

$h_a$  і  $h_b$  - відстані, відраховані вздовж лінії дії сили  $P$ , від рівня центра залишкової вм'ятини до найбільш віддаленої від нього (без врахування напливу) точок контуру еліптичної (в плані) площадки контакту;

$\alpha_y$  - зворотне пружне зближення контактуючих тіл.

Повне зближення в пружнопластичному контакті деталей із інструментом  $\alpha$  складається з двох складових: залишкового зближення  $h$ , рівного глибині відновленої вм'ятини, і пружного зближення  $\alpha_y$ , яке зникає після зняття навантаження внаслідок того, що зникає пружна деформація деталі і інструменту таким чином:

© О.В. Сердюк, І.О. Сивак, М.А. Карватко

$$\alpha = h + \alpha_y. \quad (3)$$

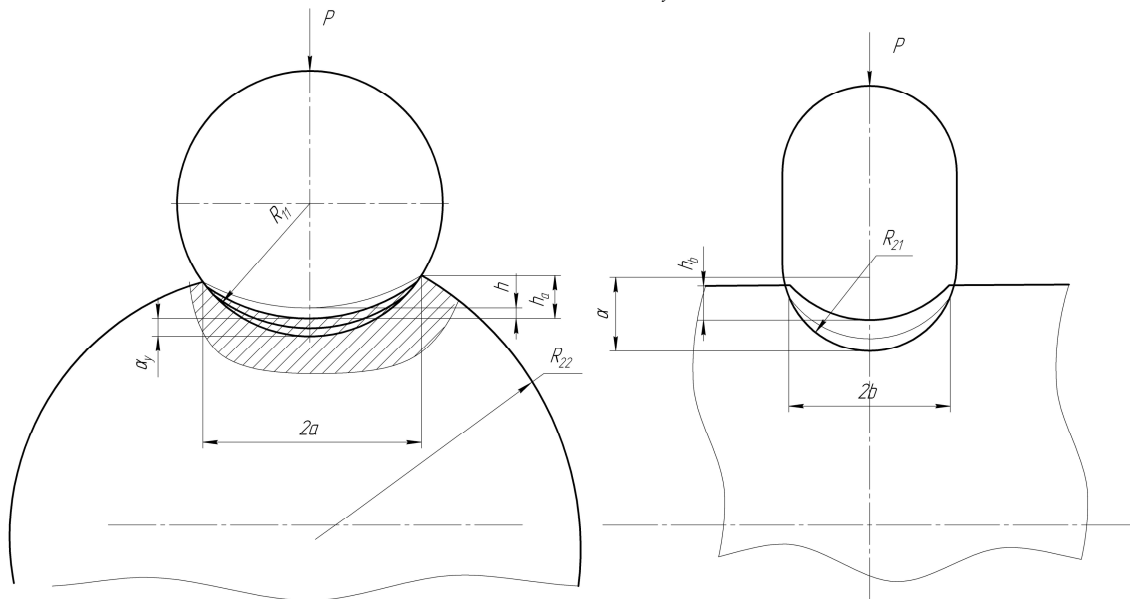


Рис. 1. Вдавлювання ролика в вал

В роботі [3] для розрахунку  $\alpha_y$  отримано наступну формулу:

$$\alpha_y = \frac{n_d}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{4} (k_1 + k_2)^2 \cdot P^2 \cdot \left[ \frac{1}{R_{11} \left(1 + \frac{2 \cdot h_a}{\alpha_y}\right)} + \frac{1}{R_{21} \left(1 + \frac{2 \cdot h_b}{\alpha_y}\right)} \right]}, \quad (4)$$

в якій невідомими геометричними параметрами є геометричні параметри вм'ятини  $\alpha_y$ ,  $h_a$  і  $h_b$

$$h_a = \frac{\pm 2R_{11}h - R_{11}\alpha_y - h^2}{2(\pm R_{12} + R_{11} - h)}; \quad (5)$$

$$h_b = \frac{\pm 2R_{22}h - R_{21}\alpha_y - h^2}{2(\pm R_{22} + R_{21} - h)}. \quad (6)$$

В якості геометричних параметрів А і В, які характеризують головні кривизни контактуючих тіл, приймають відповідно меншу і більшу із наступних двох сум:

$$A = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}} \pm \frac{1}{R_{12}} \right); \quad (7)$$

$$B = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{21}} \pm \frac{1}{R_{22}} \right). \quad (8)$$

Пружні сталі  $k_1$  і  $k_2$ , що входять в формулу (4) визначаються наступним шляхом:

$$k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi \cdot E_1}, k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi \cdot E_2}, \quad (9)$$

де  $\mu_1, \mu_2, E_1, E_2$  - коефіцієнти Пуассона і модулі пружності матеріалів інструменту і деталі.

При вдавлюванні тороїдального ролика в поверхню деталі в області контакту виникає залишкова вм'ятина, навколо якої завжди знаходиться пластично деформована область, яка поширюється на деяку глибину  $h_s$ . Ця область обмежена замкнутою поверхнею, на границі якої інтенсивність напружень  $\sigma_u$  дорівнює границі текучості матеріалу заготовки  $\sigma_T$ .

Величина  $h_s$  характеризує механічний стан (зміцнення, запас пластичності) металу в осередку деформації, як при одиничному контакті, так і при поверхневому пластичному деформуванні.

В роботі [10] показано, що з розвитком деформації розподіл тиску по поверхні контактної площадки трансформується від сферичного на пружній стадії деформації до близького до рівномірного при розвинутій пластичній деформації в зоні контакту. В роботі [3] показано, що і для випадків, коли контур вм'ятини має еліптичну форму, розподіл тиску по поверхні контакту також близький до рівномірного. Виходячи із такого припущення можна вважати, що:

$$\delta = \delta_{\bar{n}\bar{a}\bar{b}} = \frac{D}{\pi \cdot a \cdot b}. \quad (10)$$

В роботі [3] приведено формула для розрахунку головних напружень  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  (початок координат в центрі контакту, осі X і Y співпадають відповідно з великою і малою осями симетрії еліптичної площадки, а вісь Z – з напрямком рівнодіючої сил контактної навантаження):

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \left( \left( \frac{1-2\mu}{\rho(\rho+z)} - \frac{3zr^2}{\rho^5} \right) \sin^2 \varphi + (1-2\mu) \left( \frac{z}{\rho^3} - \frac{1}{\rho(\rho+z)} \right) \cos^2 \varphi \right) \rho r dr d\varphi; \\ \sigma_y &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \left( \left( \frac{1-2\mu}{\rho(\rho+z)} - \frac{3zr^2}{\rho^5} \right) \cos^2 \varphi + (1-2\mu) \left( \frac{z}{\rho^3} - \frac{1}{\rho(\rho+z)} \right) \sin^2 \varphi \right) \rho r dr d\varphi; \\ \sigma_z &= \frac{3}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{z^3}{\rho^5} \rho r dr d\varphi, \end{aligned} \quad (11)$$

де  $\rho = \sqrt{\delta^2 + \delta'^2 + z^2}$ ;  $p$ - тиск в довільній точці з полярними координатами  $r$  і  $\varphi$  - площадки контакту (кут  $\varphi$  відраховується від осі  $y$ ),  $r_0 = 1/\sqrt{\sin^2 \varphi / a^2 + \cos^2 \varphi / b^2}$  - значення полярного радіуса  $r$  на контурі площадки контакту,  $\mu$  - коефіцієнт Пуассона матеріалу деталі.

На рис. 2 приведено розподіл напружень по глибині та по осях  $x$  та  $y$  отриманий за розрахунками по формулах (11).

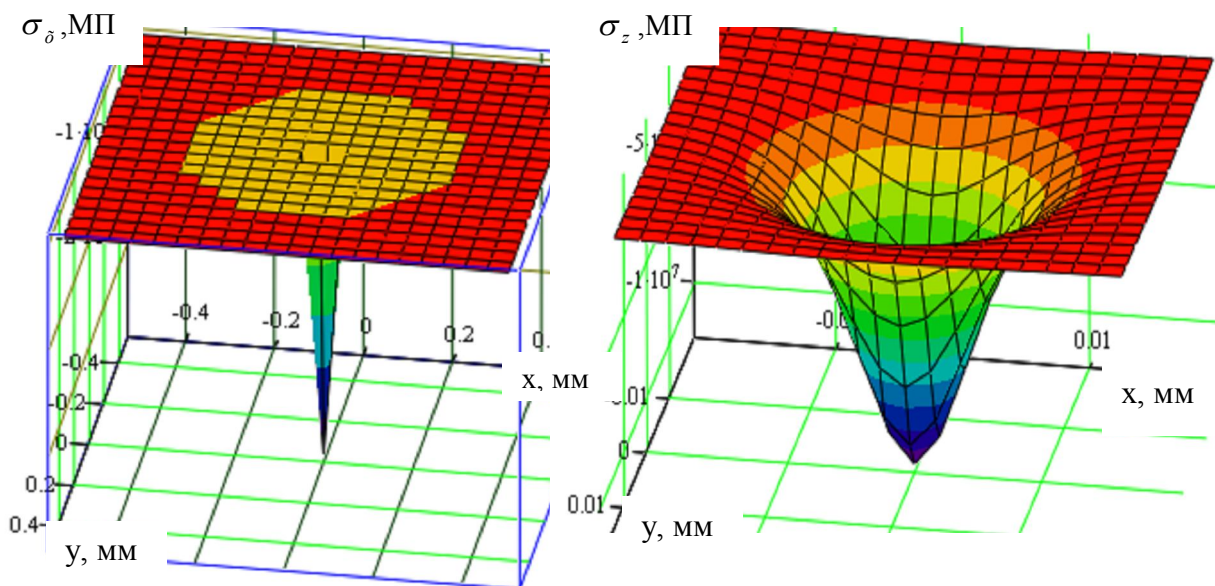


Рис. 2. Розподіл напружень  $\sigma_{\delta}$  та  $\sigma_z$  в осередку деформації

Такий розподіл отримано для вдавлювання ролика з профільним радіусом 5 мм в вал діаметром 50 мм. За таких умов полуосі еліпса відбитку складають близько 1 мм, тобто можна знехтувати піковою деформацією, що виникає в точках близьких до центру осередку деформації, оскільки це просто наслідок розрахунку деяких величин близьких до 0.

Якщо виконати інтегрування рівнянь (11) по змінній  $r$ , з врахуванням того, що  $\delta = \delta_{\bar{n}\bar{a}\bar{b}} = const$  і  $r \neq const$  то отримаємо [3]:

$$\sigma_x = \frac{2}{\pi} \cdot P_{\text{ндо}} \cdot \int_0^{\pi/2} \left\{ \left[ 2(1-2\mu) \cdot \ln \frac{L+1}{2L} + 2(2-\mu)L - L^3 \right] \cdot \sin^2(\varphi) - (1-2\mu) \left( L + \ln \frac{L+1}{2L} \right) \right\} d\varphi - \frac{1+2\mu}{P_{\text{ндо}}}; \quad (12)$$

$$\sigma_y = \frac{2}{\pi} \cdot P_{\text{ндо}} \cdot \int_0^{\pi/2} \left\{ \left[ 2(1-2\mu) \cdot \ln \frac{L+1}{2L} + 2(2-\mu)L - L^3 \right] \cdot \cos^2(\varphi) - (1-2\mu) \left( L + \ln \frac{L+1}{2L} \right) \right\} d\varphi - \frac{1+2\mu}{P_{\text{ндо}}}; \quad (13)$$

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \cdot P_{\text{ндо}} \cdot \int_0^{\pi/2} L^3 d\varphi - P_{\text{ндо}}, \quad (14)$$

де  $L = \frac{z}{h} \left( \frac{1}{1-e^2 \sin^2 \varphi} - \frac{z^2}{h^2} \right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $e = \sqrt{1 - \left( \frac{h}{a} \right)^2}$  - ексцентриситет контура еліптичної

площинки, по поверхні якої розподілений тиск р.

$$h_s = b \left[ \frac{4}{5 \left( \frac{b}{a} \right)^{3/2} + 3} \left( \frac{P}{a \cdot b \cdot \sigma_T} - \frac{17}{6 + \ln \frac{b}{a}} \right) \right]^{\frac{5}{10 + \ln \frac{b}{a}}}. \quad (15)$$

Відповідно з формулами (12)-(14) отримано розподіл напружень в залежності від z, та глибини відбитку (рис.3).

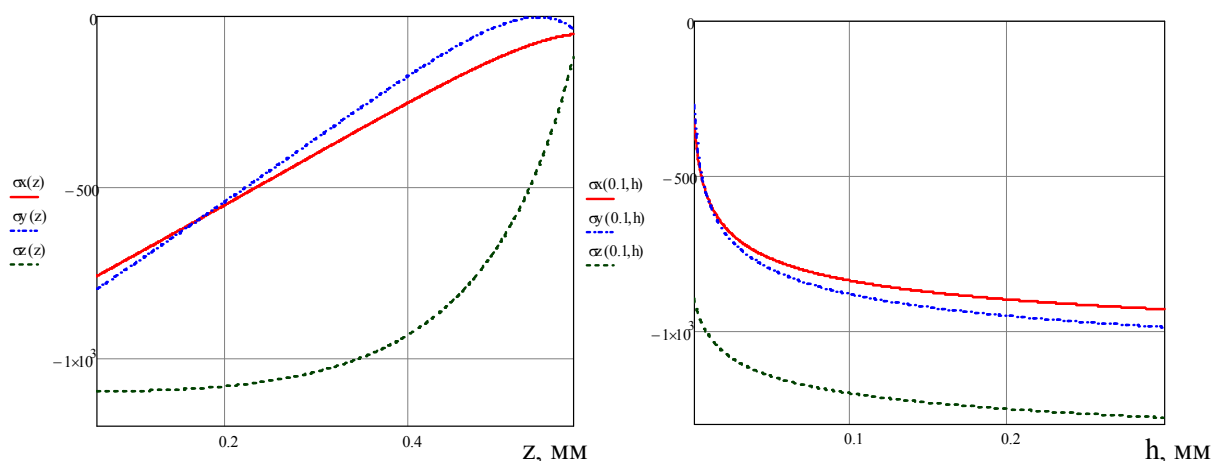
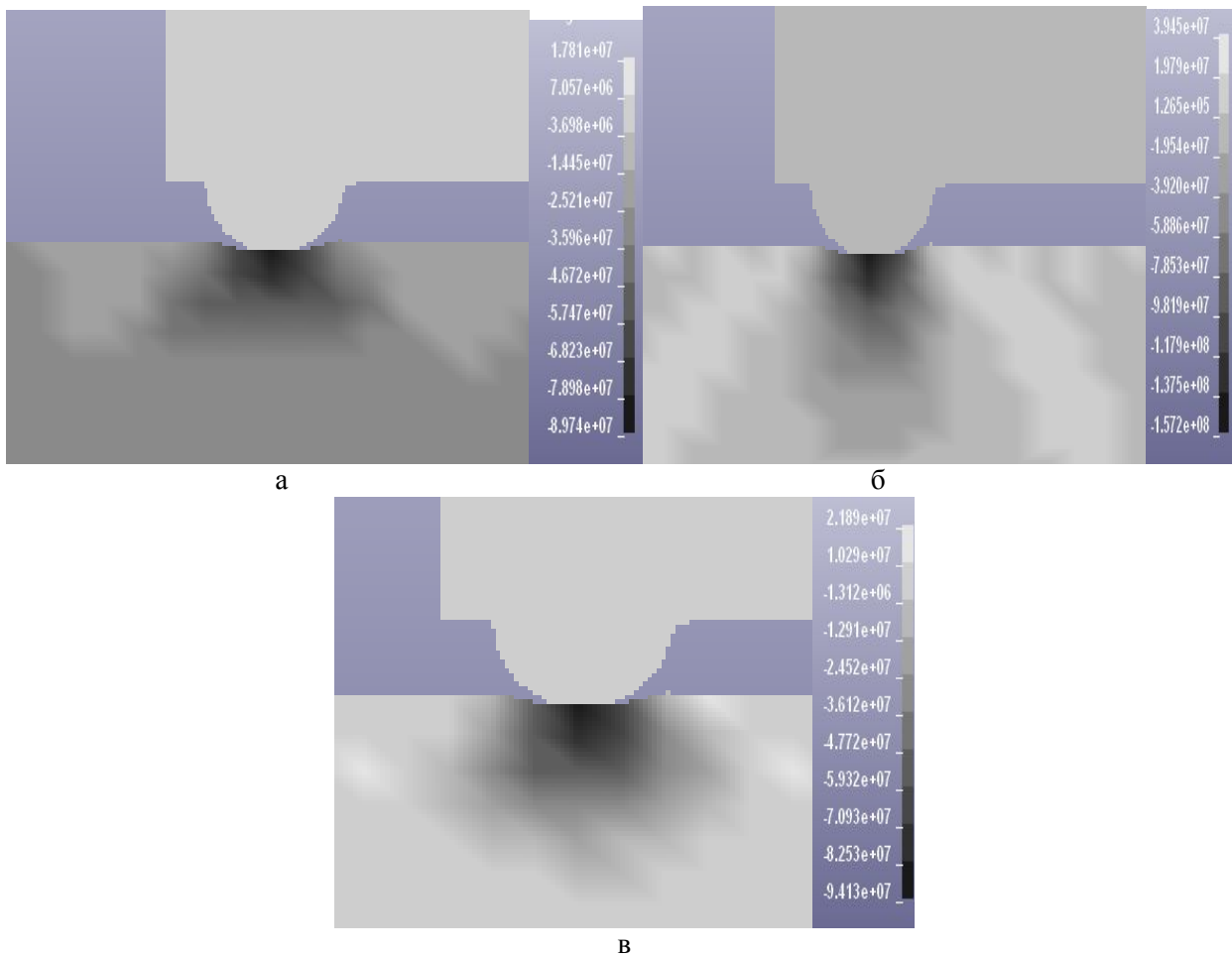


Рис. 3. Залежність напружень від відстані від поверхні z та глибини вдавлення ролика h

Крім того дана задача розв'язувалася за допомогою математичного моделювання в програмі LS-DYNA. Програма призначена для розрахунків швидкоплинних, динамічних задач і процесів, що мають значну нелінійність. Програма дозволяє змоделювати практично всі процеси обробки металів тиском. При цьому немає обмежень по розмірам і формі заготовок на відміну від теоретичних розрахунків. Пов'язано це з тим, що при створенні кінцево-елементної моделі виконується розбиття заготовки будь-якої складності на елементарні кінцеві елементи.

В даній моделі розглядалося вдавлення ролика діаметром 30 мм, з профільним радіусом 5 мм в сталевий вал (Сталь 45) діаметром 50 мм. В результаті чого отримано розподіл напружень по поверхні і глибині поширення пластичної деформації, показаний на рисунку 4. В програмі напруження має розмірність кгс/м<sup>2</sup>.

Рис. 4. Напруження при вдавлюванні ролика (а- $\sigma_x$ , б- $\sigma_z$ , в -  $\sigma_\phi$ )

Із отриманих результатів видно, що при вдавлюванні напруження  $\sigma_x$ ,  $\sigma_\phi$  стискуючі, а напруження  $\sigma_z$  стискує під роликом, але розтягує перед та після нього на поверхні деталі. Що підтверджує складний напружений стан при вдавлюванні та обкочуванні деталі.

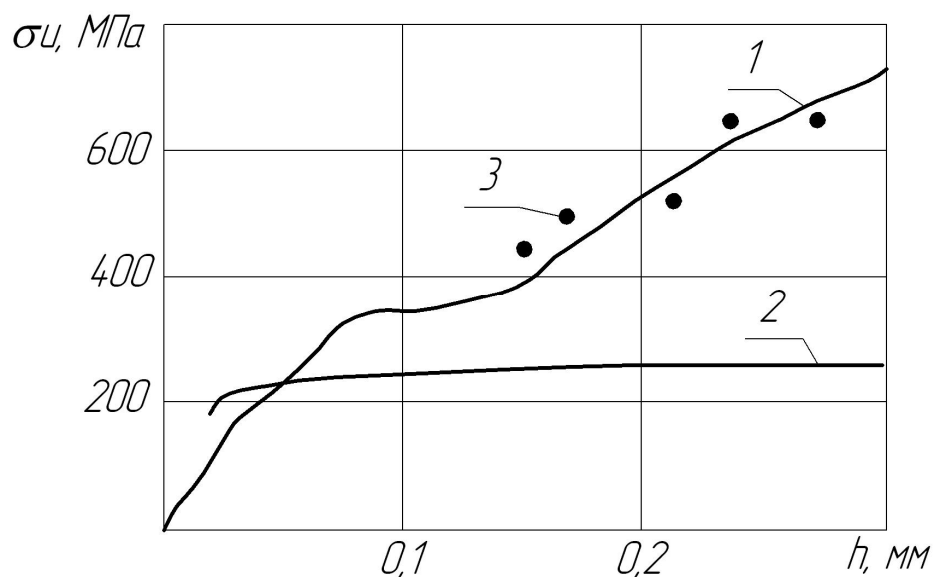


Рис. 5. Інтенсивність напружень (1 отримана за допомогою програми LS-DYNA; 2 отримана математичним моделюванням; 3 – отримана експериментально)

Для підтвердження виконаного моделювання за аналогічних вихідних даних (матеріал деталі та інструмента, зусилля) проведено експериментальні дослідження вдавлювання ролика і виміряно твердість, по глибині в осередку деформації. За допомогою тарувального графіка для сталі 45 отримано значення інтенсивності напружень.

Використовуючи дані отримані при математичному моделюванні розраховано інтенсивність напружень за формулою [6]:

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} . \quad (16)$$

За допомогою програми LS-DYNA отримано значення інтенсивності напружень при різній силі вдавлювання і відповідно різній глибині та геометрії відбитка. Отримані значення інтенсивності напружень наведено на рис. 5.

Аналізуючи вище викладене можна зробити такі висновки:

- математичне моделювання дає занижені значення інтенсивності напружень, що пов'язано із рядом прийнятих припущень;
- кращі результати забезпечує моделювання в LS-DYNA, які показують наявний всесторонній стиск під роликом та розтяг в вершинах хвиль перед та після ролика;
- найбільш небезпечним є вершина хвилі, в якій може відбуватися руйнування поверхневого шару. Цей дефект небезпечний тим, що не завжди може бути візуально помічений оскільки ролик при обкатуванні закручує частково дефекти, які можуть проявитися при експлуатації деталі.
- нерівномірність розподілу напружено-деформованого стану в поверхневому шарі зростає із збільшенням відношення осей еліпса  $a/b$ .

1. Афонин А.Н. Моделирование процесса поверхностного объемного пластического деформирования / А.Н. Афонин, А.В. Киричек, А.Г. Апальков, Д.А. Должинов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – №10. – С. 29-32.
2. Блюменштейн В.Ю. Расчетная модель остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя при размерном совмещенном обкатывании / В.Ю. Блюменштейн, М.С. Махалов // Вестник Кузбас. Гос. Техн. Ун-та. – 2008. – №5. – С. 50-58.
3. Дрозд М.С. Инженерные расчёты упруго – пластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
4. Киричек А.В. Повышение эффективности обкатывания оболочек роликами технологическими методами / А.В. Киричек, А.Ю. Мальцев, М.Ф. Селеменев, А.Ф. Осипова // Вестник РГТА. – 2010. – №2(17). – С. 60-63.
5. Матлин М.М. Проектирование процесса упрочняющего обкатывания деталей цилиндрическим роликом / М.М. Матлин, А.В. Бабаков // Вестник машиностроения. – 2002. – №5. – С. 60-63. – ISSN 0042-4633.
6. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В.А. Огородников – Киев: УМК ВО, 1989. – 151 с.
7. Отений Я.Н. Сравнительный анализ определения глубины упрочнения при поверхностном пластическом деформировании по различным методикам / Я.Н. Отений // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – №3. – С. 3-4.
8. Саушкин М.Н. Конечно-элементное моделирование распределения остаточных напряжений в сплошных упрочненных цилиндрических образцах и образцах с полукруглым надрезом / М.Н. Саушкин, А.Ю. Куров // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки.-2011. – №3(24). – С. 72-78.
9. Сидякин Ю.И. Повышение эффективности упрочняющей механической обработки валов обкаткой их роликами или шариками / И.Ю. Сидякин // Вестник машиностроения. – 2001. – №2. – С. 43-49. – ISSN 0042-4633.
10. Смелянский В.М. Исчерпание запаса пластичности металла в поверхностном слое деталей при обработке обкатыванием / В.М. Смелянский, Калпин Ю.Г., Баринов В.В. // Вестник машиностроения. – 1990. – №8 – С. 34-38.