

## РОЗВИТОК МОДЕЛІ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ОСАДЖУВАННІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ЗРАЗКА ОБКОЧУВАННЯМ

---

*Предлагаемая модель пластических деформаций основана на физических явлениях штамповки обкатыванием цилиндрического образца с учетом реальной геометрии локализованного очага деформации. Статья является результатом экспериментальных и теоретических исследований, которые проводятся на кафедре механики пластичности материалов и ресурсосберегающих процессов Национального технического университета Украины «КПИ».*

*The proposed model of plastic flows is based on the physical phenomena of stamping the rotary upsetting of cylindrical billet into account the real geometry of local hearth of deformation. The article is the result of experimental and theoretical researches which are conducted on the department of mechanics of plasticity of materials and resource-safe processes of the National technical university of Ukraine «KPI».*

---

Особливістю штампування обкочуванням є локалізований осередок деформації. Форма осередку деформації визначена теоретично [1] і експериментально [2]. В залежності від співвідношення розмірів осередку переважають тангенціальні або радіальні деформації [3]. При найбільш ефективних параметрах штампування, коли співвідношення площі осередку  $F_K$  до площі торця заготовки  $F$  знаходяться в межах  $\lambda = F_K/F \approx 0,1$ , переважають тангенціальні деформації [4, 5], які викликають пластичні деформації і в позаконтактній частині деталі.

В основу будови моделі покладена модель [6], яка спирається на якісні ефекти, що були встановлені експериментально при осаджуванні обкочуванням циліндричних зразків. Основним якісним моментом, який був врахований в [6] і був встановлений в ході експериментів [2, 3], але який не можливо врахувати при аналітичному визначенні контуру пластичного осередку з геометричних міркувань [1], є наявність і реєстрація в центральній області напружень розтягу. Дія яких призводить в цьому місці до розпушувань суцільності металу, утворення поверхневої лунки і навіть руйнування.

Наявність зони, що розтягнута, свідчить про переважно тангенціальну течію металу в контактному пластичному осередку. Тангенціальна течія металу обумовлена тим, що енергетичні витрати на подолання сил тертя вздовж осередку (в радіальному напрямі) в 3...5 разів вище ніж поперек (в тангенціальному напрямі). А саме такі геометричні пропорції має ефективний осередок при  $\lambda \approx 0,1$ .

Механізмом деформування [6], який пояснює ефект утворення центральної лунки, є пластичний вигин заготовки в позаконтактній області, що протилежить осередку деформування. Це підтверджується не тільки опосередкованими ефектами, а і стовщенням полотнища заготовки, що протилежить осередку деформування, а також спостереженням поля ліній ковзання (Чернова-Людерса) в цій частині на торцевій поверхні заготовки.

Незважаючи на те, що в модель [6] спитається на якісні фізичні ефекти одним із припущень при її будові була заміна реальної плями контакту на рівновеликий сектор.

На рис. 1 надане графічне порівняння рівновеликих за площиною плям контакту між інструментом і заготовкою: сектора кола і теоретичної плями для кола такого ж радіусу (побудованої за методикою [1]). Досвід використання моделі [6] при технологічних розрахунках показав наявність похибок, що викликані заміною осередку сектором, та певну обмеженість її використання для всього періоду робочого циклу осаджування.

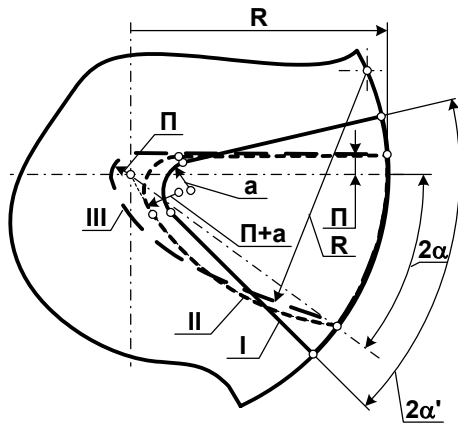


Рис. 1. Порівняння осередків деформацій: I – осередок по [6]; II – осередок запропонованої моделі; III – осередок збудований аналітично по [1] без врахування зони розтягування.

Ціллю статті є побудова моделі на базі локалізованого осередку деформації максимально наближеного до реального та обґрунтування періоду існування запропонованої моделі.

В основу запропонованої фізичної моделі напружено-деформованого стану (див. рис. 2) покладені наступні припущення:

- Початком дії моделі можна вважати момент прояву напружень розтягу в центральній зоні циліндричної заготовки або початок утворення лунки і відсутності контакту між інструментом і заготовкою (чи наявності контактних умов між ними, що суттєво відрізняються від

середніх). Експериментально встановлено (шляхом виявлення лунки), що такий період починається вже під час першого десятку циклів обкочування і загалом становить 80...85% часу робочого циклу. Цей період будемо вважати сталою фазою.

- Процес в межах одного циклу обкочування – стаціонарний, тобто параметри осередку і властивості матеріалу за цей час не змінюються.

▪ Локалізований осередок деформування замінюємо максимально наближеною до реального осередку і рівновеликою за площею прямою, яка утворена чотирма елементами: 1 – реальною прямою межею DF, що розташована на відстані Π від радіусної лінії OD<sub>1</sub>; 2 – радіусною частиною FF' радіусу Π+a; 3 – радіусною частиною F'D', що відображає передній фронт плями контакту радіусом R; 4 – співпадаючою з зовнішнім контуром частиною D'D радіусом R; геометрія плями описується чотирма геометричними величинами: Π, Π+a, R та вписаним в неї сектором з кутом про вершині 2α. Згадана величина Π – параметр штампування обкочуванням, який дорівнюється,

$$\Pi = \frac{S}{2\pi * \operatorname{tg}\gamma}, \quad (1)$$

де: S – осьова подача на один оберт активного інструменту;  
 γ – кут нахилу інструменту, що обкочується.

- Дія напружень підпору вздовж контуру осередку деформації від недеформованих зон симетрична, це допущення базується на наступному: – з однієї сторони напруження підпору діють вздовж прямої DF, що розташована на відстані Π

від радіусної лінії OD<sub>1</sub>, кут нахилу становить з горизонтальною віссю симетрії кут  $\alpha$  ; – з другої вдовж радіусної частини (дуга F'D'), що відображає передній фронт плями радіусом R, на цій ділянці напруження підпору вважаємо симетричними відносно осі симетрії та замінюємо їх проекцією на пряму F'F'', що розташована на відстані П від радіусної лінії OD' та симетрична FD та створює з нею кут  $2\alpha$  .

- Із-за дії сил тертя в місці контакту позаконтактна частина заготовки може вільно рухатись відносно контактної осередку не викликаючи додаткового навантаження;

- Вважаємо, що полотно заготовки настільки тонка (при  $d/h \geq 4$  , де d – діаметр зразка, h – його висота), що напруження і пластична деформація в локалізованому осередку від технологічного навантаження рівномірні по товщині.

Запропонована геометрія контакту, на відміну від [6], максимально наближена до реальної геометрії, зокрема на рис. 1 також надана пляма контакту побудована з допущенням, що передній фронт контакту описаний дугою радіуса R. Аналітичний розрахунок показує, що при  $\lambda=0,1$  площі контурів відрізняються на 3,7% і збігання контурів, як видно з рис. 1, задовільне.

Перелічені припущення дозволяють вважати деформації в позаконтактній частині заготовки як в [6] плоскими, розглядати цю частину деталі як жорстко-пластичне тіло та використовувати при будові поля ліній ковзання загальні принципи теорії пластичності [7].

Пластичний вигин в позаконтактній зоні виникає і розвивається під дією моменту, який викликаний тангенціальною течією металу з приконтактного осередку деформації. Для виконання умови рівноваги необхідно враховувати наявність пластичних зон, що примикають до локалізованого осередку. Тому заготовка розділена на жорсткі (А, Б) та пластичні (В, Г) зони. Точка С, яка є миттєвим центром обертання жорстких зон А та Б.

Областю залежності точки С є дуга кола PO<sub>1</sub> радіусом R. Тобто рішення в області Г згідно з умовою про початкові значення будуть відомі. Дуга кола виходить на вільну поверхню, тоді поле ковзання утворено логарифмічними спіралями, а напруження визначаються формулами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\rho} &= 2K * \ln \frac{\rho - b}{R} \\ \sigma_{\varphi} &= 2K \left( \ln \frac{\rho - b}{R} - 1 \right) \\ \Pi + a + h &< \rho \leq R + b \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де:  $\rho$  – радіус-вектор, що виходить з центру O<sub>2</sub>; знак вибраний таким чином, щоб напруження  $\sigma_{\varphi}$  було стискаючим.

Наведене вище стосується і до областей А та Б, якщо припустити, що вздовж DG дотичні напруження відсутні. Правомірність такого допущення спирається на те, що на ділянці DG мають місце як тангенціальні, так радіальні деформації в локалізованому осередку. Тоді для зони А та Б

$$\left. \begin{aligned} \rho &= 2K * \ln \frac{\rho}{R} \\ \sigma \sigma_{\varphi} &= 2K \left( \ln \frac{\rho}{R} - 1 \right) \\ m &< \rho \leq R \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

де:  $\rho$  - радіус-вектор, що виходить з центру  $O_3$ ; знак вибраний таким чином, щоб напруження  $\sigma_{\varphi}$  було стискаючим.

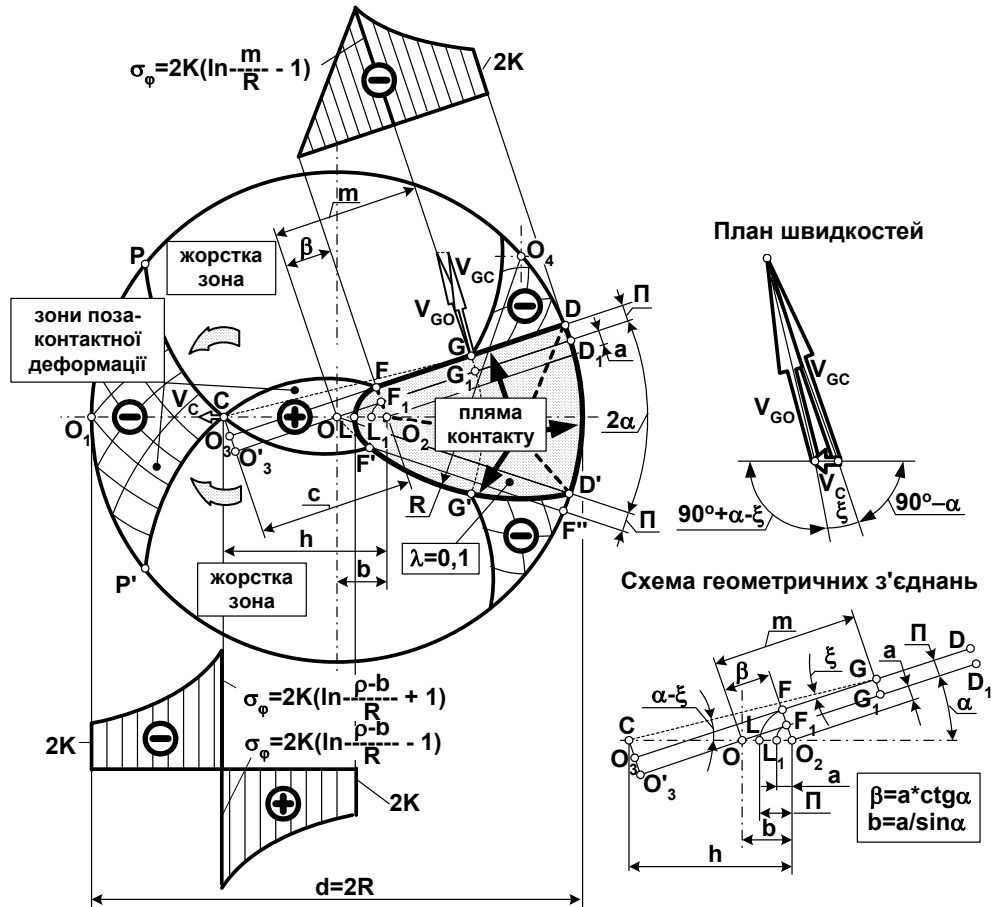


Рис. 2. Модель пластичних деформацій при осаджуванні тонкої циліндричної заготовки обкочуванням.

Загальна границя контактної та розтягнутої зон уявляється дугою FL, яка вільна від радіальних напружень. З'ясувати детальний абрис дуги не можливо. Ймовірно задати її для сталої фази дугою кола радіусом  $\Pi+a$ . В такому випадку крайові умови не залежать від полярного кута  $2\alpha$  з вершиною в точці  $O_2$  і поблизу дуги буде вісесиметричне поле ковзання.

Напруження в цій зоні задані виразами

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\rho &= 2K \cdot \ln \frac{\rho}{\Pi+a} \\ \sigma_\varphi &= 2K \left( \ln \frac{\rho}{\Pi+a} + 1 \right) \\ \Pi+a &\leq \rho < \Pi+a+h \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

знак вибраний таким чином, щоб  $\sigma_\varphi$  було напруженням розтягу.

Характер контуру межі контактної зони поза FL, тобто спосіб продовження дуги кола, в даному випадку на розподіл напружень в зоні А не впливає. Тому відрізок FD зручно розглядати таким, що проходить вздовж радіуса заготовки OD<sub>1</sub> на відстані Π, як і для реального контуру. Кут вершини F<sub>1</sub>D<sub>1</sub> (2α) приймаємо з геометричної побудови за якою складене рівняння площин (α в град.)

$$\pi\lambda R^2 \approx 0,0174 \cdot \alpha \cdot R^2 + 0,01745 R^2 \cdot \alpha - \frac{\sqrt{3}}{4} R^2 + \Pi \cdot R \quad (5)$$

Звідки

$$\alpha = \frac{R(\pi\lambda + 0,433) - \Pi}{0,0349R} \quad (6)$$

Числові розрахунки показують, що кут 2α відрізняється від подвійного кута в моделі [7] на (0,7...0,85)2α в залежності від λ, надалі для найбільш ефективних параметрів обкочування при λ=0,1 можна вважати 2α=0,8\*π\*λ (де λ - співвідношення площі контакту до площі поперечного перетину заготовки).

Таким чином всі побудови на рис. 2 визначаються трьома параметрами - a, h, m. Для їх знаходження скористаємось:

- умовою рівності нулю головного вектора напружень по осі O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>;
- умовою рівноваги позаконтактної частини заготовки, тобто рівністю моменту, що викликаний напруженнями в перерізі O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>, до моменту, який створений тангенціальною течією металу в локалізованому осередку деформації;
- умовою рівності нулю тангенціальних напружень в визначеному циліндричному перерізі локалізованого осередку.

Перелічені умови мають вигляд системи:

$$\left. \begin{aligned} \int_{\Pi+a}^{R+b} \sigma_\varphi d\rho &= 0 \\ \int_{\Pi+a}^{\Pi+a+h} \rho \cdot \sigma_\varphi \cdot d\rho - \int_{\Pi+a+h}^{R+b} \rho \cdot \sigma_\varphi \cdot d\rho + \int_{\beta}^R (\rho+c) \cdot \sigma_\varphi \cdot d\rho &= 0 \\ \varepsilon_\varphi &= \varepsilon_\varphi^* \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

де:  $c = a \left( 1 + \frac{h}{a} - \frac{1}{\sin \alpha} \right) \cos \alpha$ ;  $b = \frac{a}{\sin \alpha}$ ;  $\beta = a \cdot \operatorname{ctg} \alpha$ ;

$\varepsilon_\varphi^*$  - тангенціальна деформація у визначеному перерізі  $\rho=m$ ;

$\varepsilon_\varphi$  - усереднена тангенціальна деформація.

Інші позначення відповідають рис. 2.

Система рівнянь (7) являє собою систему відносно трьох невідомих  $a$ ,  $h$ ,  $m$ .

Для розв'язку системи рівнянь (7) відносно невідомих  $a$ ,  $h$ ,  $m$  розроблена блок-схема алгоритму та відповідна програма.

Розміри геометричного осередку деформації визначаються в програмі розрахунків в залежності від радіусу заготовки  $R$  та величини  $\lambda$ .

Оскільки розроблена модель розроблена на параметричній основі то при фактичних розрахунках всі параметри  $a$ ,  $h$ ,  $m$  лінійно залежать від поточного значення розмірів заготовки.

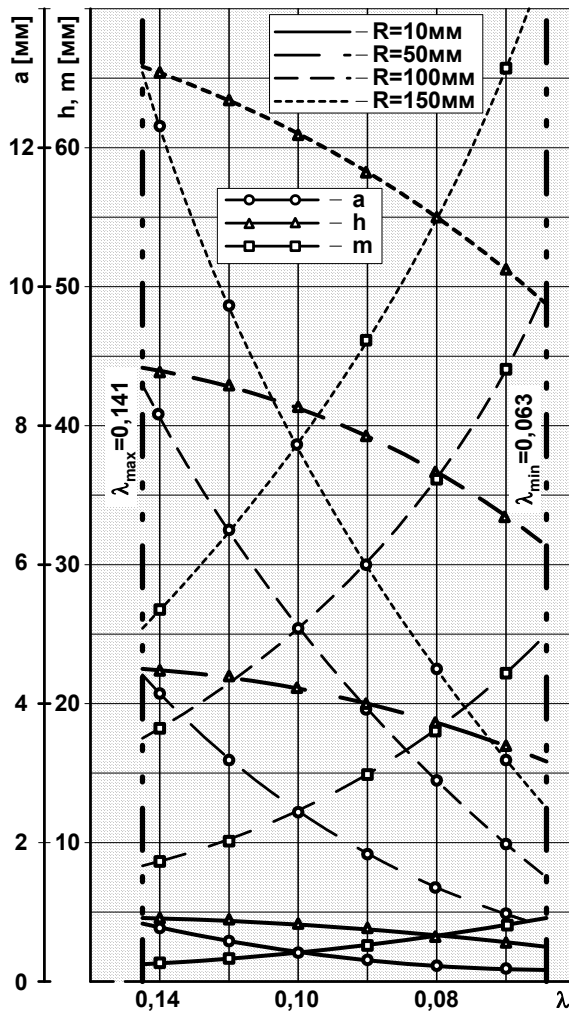


Рис. 3. Залежність геометричних розмірів осередку пластичної деформації від коефіцієнту  $\lambda$ .

її існування в залежності від коефіцієнту  $\lambda$ , що є суттєвим при виконанні технологічних розрахунків.

Одночасно треба відзначити, що зазначена модель має певні межі існування:

по-перше, вона описує деформації і напруження в тонкій заготовці (її геометричні співвідношення задані раніше);

На рис. 3 надано залежність геометричних розмірів осередку пластичної деформації  $a$ ,  $h$ ,  $m$  від коефіцієнту  $\lambda$  для заготовок радіусів  $R=10$  мм;  $R=50$  мм;  $R=100$  мм;  $R=150$  мм.

Для поточного радіусу  $R=100$  мм в програмі виконується розрахунок розподілу напружень  $\sigma_\phi$  та  $\sigma_r$  вздовж межі приконтальної зони локалізованого осередку деформації для всієї області існуючих значень коефіцієнту  $\lambda$  з визначенням  $\lambda_{\max}$  та  $\lambda_{\min}$ . На рис. 4 надані епюри розподілу тангенціальних  $\sigma_\phi$  та радіальних  $\sigma_r$  напружень вздовж локалізованого осередку деформації для радіусу заготовки  $R=100$  мм та коефіцієнту  $\lambda$  від 0,063 до 0,141 (в моделі [6]  $\lambda$  змінюється від 0,079 до 0,148).

Таким чином, побудова моделі пластичних деформацій заснована на контурі контакту максимально наближеного до реального, дала можливість уточнити (до 20%) достовірні межі

по-друге, відповідає тільки періоду протікання сталого (хоч і найдовшої) фази деформування.

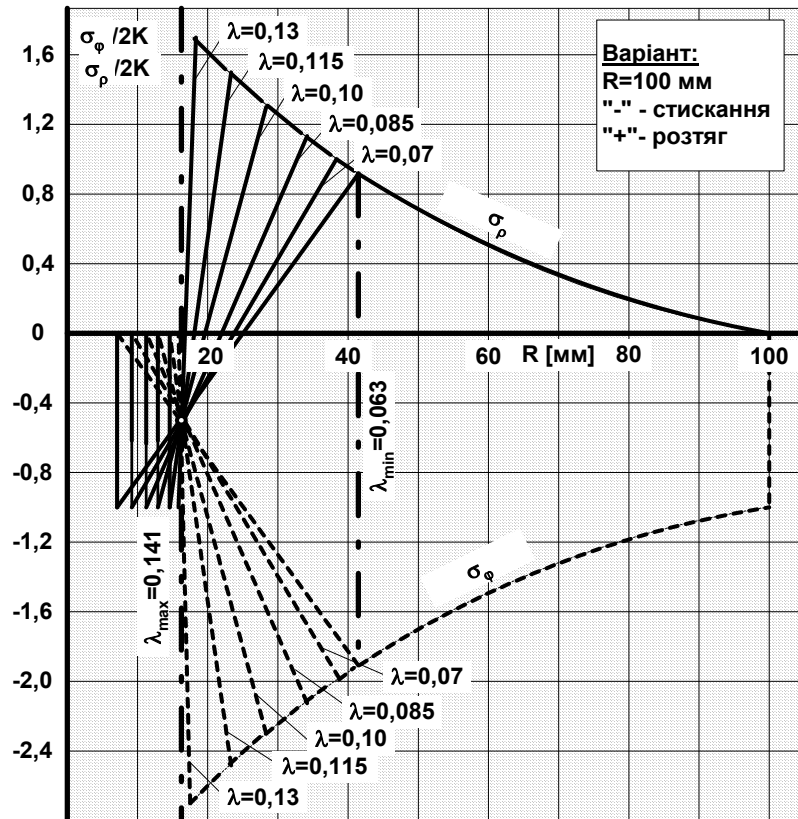


Рис. 4. Епюри теоретичного розподілу тангенціальних  $\sigma_{\phi}$  та радіальних  $\sigma_{\rho}$  напружень вздовж радіусу зразка.

Можливими напрямками наступних досліджень є розробка моделей: деформування високого зразка; початкового періоду при обробці тонкого зразка; створення сукупної моделі, що охоплює весь хід осаджування циліндричної заготовки.

#### Список літератури

1. Кривда Л.Т., Гожій С.П. Геометрія контакту при пластичному деформуванні обкочуванням. // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2006. - №3(47). - С. 49-56
2. Кривда Л.Т., Пшенишнюк А.С. Экспериментальная установка для исследования процесса штамповки с обкатыванием. // Вестник Киевского политехнического института. – 1979. - № 16. – С. 18-22.
3. Ковалев В.А., Колос В.И. Особенности формоизменения заготовок при штамповке обкаткой. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1981. - №2. - С. 11-12.
4. Гожій С.П. Засади і проблеми використання ресурсозберігаючих технологій обробки металів тиском. // Технологические системы. – 2006. - №2 (34). с. 64-68.
5. Гожій С.П., Кривда Л.Т. Штампування обкочуванням як засіб ресурсозбереження. // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2006. - № 2(46). С. 55-60
6. Кривда Л.Т., Гожій С.П. Построение модели пластических течений при осадке обкатыванием цилиндрической заготовки. // Прогресивна техніка і технологія машинобудування і зварювального виробництва. Праці Міжнародної конференції, присвяченої 100-річчю механіко-машинобудівного і 50-річчю зварювального факультетів. Том II. К.: НТУУ «КПІ». - 1998. - С. 454-458.
7. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с.