

УДК 621.77

Краєвський В. О.  
Матвійчук В. А.  
Михалевич В. М.  
Старушок Н. Ю.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЗОВНІШНІХ БУРТІВ МЕТОДОМ РОТАЦІЙНОЇ ВИТЯЖКИ**

Для реалізації процесу формування зовнішніх буртів методом ротаційної витяжки був спроектований і виготовлений розкочувальний пристрій до лоботокарного верстата ЛТ2 [1], загальний вигляд якого показано на рис. 1. Зважаючи на специфіку процесу, що розробляються, а саме на ту обставину, що він розробляється на обладнання, яке фактично не призначене для таких операцій, енергосиловий розрахунок необхідний насамперед для забезпечення безвідмовної роботи цього обладнання. Крім обладнання, можливості процесу ротаційної витяжки обмежуються такими технологічними параметрами:

- мінімальний радіус заокруглення оправки: обмежується руйнуванням зовнішніх шарів осередку згинання;
- максимальний розмір бурта: обмежується інтенсивним гофроутворенням та руйнуванням периферійних ділянок.

В існуючих методиках розрахунку зусилля [1, 2, 3, 4], що необхідне для процесу ротаційної витяжки, радіусами заокруглень оправки та валка нехтували. Для визначення зусиль у процесі ротаційної витяжки використовували розв'язок невісесиметричної задачі для прогину круглої пластини, що затиснена по внутрішньому контуру під дією зосередженої сили [1, 2]. При цьому зусилля за такою методикою оцінювалось на початку процесу, коли прогини співрозмірні із товщиною заготовки. На цій стадії процесу, при значних радіусах заокруглень оправки та валка (порівняно із товщиною заготовки) для формозміни заготовки зусилля прикладається значно менше, ніж при наступному протіканні процесу, внаслідок значного плеча дії сили. Очевидно, що при подальшому протіканні процесу ротаційної витяжки плече сили буде змінюватись.

Мета роботи – запропонувати методику визначення енергосилових параметрів процесу формування зовнішніх буртів методом ротаційної витяжки та визначити його технологічні можливості.

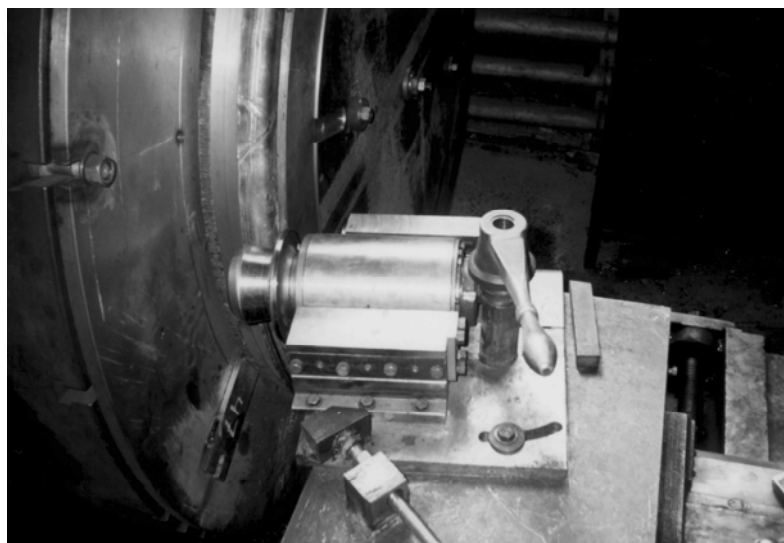


Рис. 1. Розкочувальний пристрій

Загальна картина процесу ротаційної витяжки показана на рис. 2. Як видно з рисунку, згинання починається на контурі  $AOB$ . Радіус згинання у точці  $O$  визначається радіусом оправки та згинальним моментом, що створюється зусиллям  $P$ . Радіуси згинання на ділянках  $OA$  та  $OB$  залежать від діаметра заготовки, ширини бурта, радіуса оправки, положення точки  $P$  – точки прикладення зусилля та радіуса валка, який контактує із заготовкою. Врахування впливу всіх перерахованих чинників викликає певні труднощі [1, 2, 3]. Тому будемо вважати, що радіус згинання на контурі  $AOB$  однозначно визначається радіусом оправки та згинальним моментом, який створюється зусиллям  $P$ , і є постійним по всій довжині контуру згинання.

Згинання заготовки по радіусу заокруглення оправки можна змодельювати у вигляді згинання смуги постійної товщини  $s = const$  та змінної ширини  $b = b(x)$  пуансоном і матрицею, радіуси заокруглень яких постійні і дорівнюють відповідно  $R_M$  та  $R_n$  (рис. 3).

Виберемо декартову систему координат, як показано на рис. 3. Для визначення ширини перерізу заготовки з координатою  $x$  в залежності від відстані перерізу до центра заготовки використаємо формулу:

$$b(x) = 2 \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} - l(x)^2}, \quad (1)$$

де  $l(x)$  – відстань від центра заготовки до перерізу із координатою  $x$ .

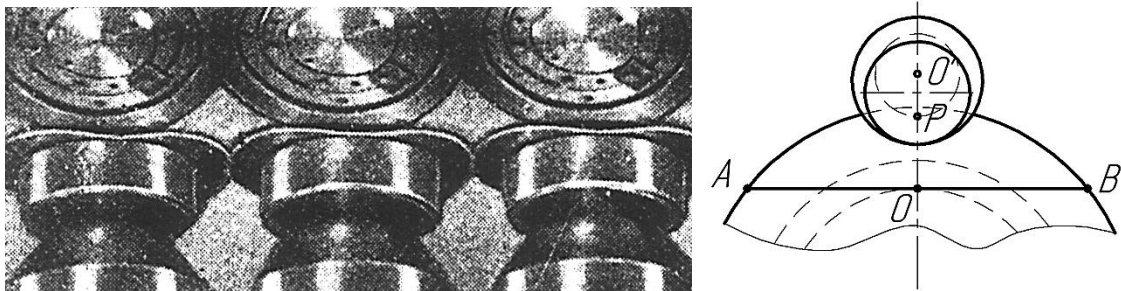


Рис. 2. Кінограма процесу ротаційної витяжки та положення контуру  $AOB$ , по якому відбувається згинання

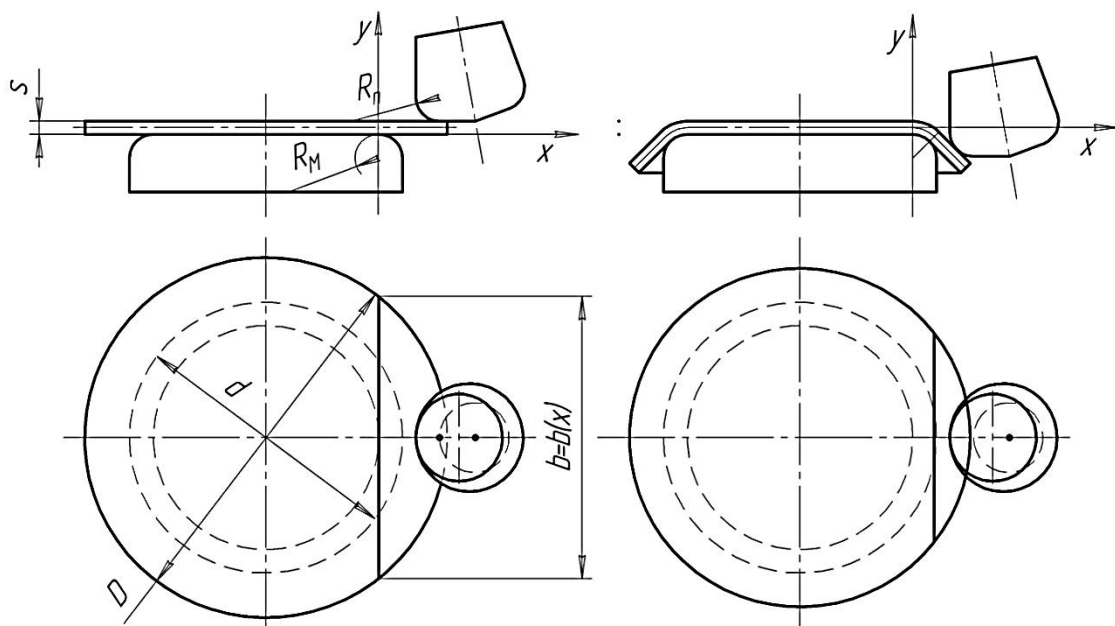


Рис. 3. Розрахункова схема

З рис. 4 видно, що:

$$l(x) = l_1 + l_2 + l_3 + l_4;$$

$$l(x) = \frac{d}{2} - R_M + \left(R_M + \frac{s}{2}\right) \cdot \arcsin\left(\frac{x_A}{R_M + s/2}\right) + \int_{x_A}^{x_D} \sqrt{\left(\frac{d\omega}{dx}\right)^2 + 1} dx +$$

$$+ \int_{x_D}^x \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + 1} dx. \quad (2)$$

Тоді:

$$b(x) = 2 \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} - \left(\frac{d}{2} - R_M + \left(R_M + \frac{s}{2}\right) \cdot \arcsin\left(\frac{x_A}{R_M + s/2}\right) + \dots\right.}$$

$$\left. \sqrt{\dots + \int_{x_A}^{x_D} \sqrt{\left(\frac{d\omega}{dx}\right)^2 + 1} dx + \int_{x_D}^x \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + 1} dx} \right)^2. \quad (3)$$

Застосувавши методіку, що запропонована у роботі [5], знайдемо точки дотику заготовки до оправки та валка  $x_A$  та  $x_B$  відповідно. Тоді зусилля, які діють на валок, визначимо за формулами:

$$P_y = \frac{b(x_A) \cdot \left[ \frac{\sigma_m \cdot s^2}{4} - \frac{\sigma_m^3 \cdot (R_M + s/2)^2}{3 \cdot E^2} \right]}{l_p}; \quad (4)$$

$$P_x = P_y \cdot \frac{t + R_M + R_n - x_B}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}, \quad (5)$$

де

$$l_p = x_B - x_A - \frac{s}{2} \cdot \left[ \cos\left(\arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R_n - x_B}\right) + \right.$$

$$\left. + \cos\left(\arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A}\right) \right] - \frac{x_B - t - R_M - R_n}{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}} \cdot \left\{ \sqrt{R_M^2 - x_A^2} - R_M + \right.$$

$$\left. + \sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2} + h - R_n + \frac{s}{2} \cdot \left[ \sin\left(\arctg \frac{\sqrt{R_M^2 - x_A^2}}{x_A}\right) + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \sin\left(\arctg \frac{\sqrt{R_n^2 - (x_B - t - R_M - R_n)^2}}{t + R_M + R_n - x_B}\right) \right] \right\}. \quad (6)$$

Для визначення складової повного зусилля  $P_z$  скористаємось емпіричною формулою, що запропонована у роботі [4]:

$$P_z = (0,2...0,3) \cdot P_y. \quad (7)$$

Більше значення  $P_z$  береться для більш пластичних металів.

Крутний момент, який необхідний для забезпечення обертального руху оправки, визначається з формули:

$$M_{кр} = P_z \cdot \left( x_B + \frac{d}{2} - R_M \right). \quad (8)$$

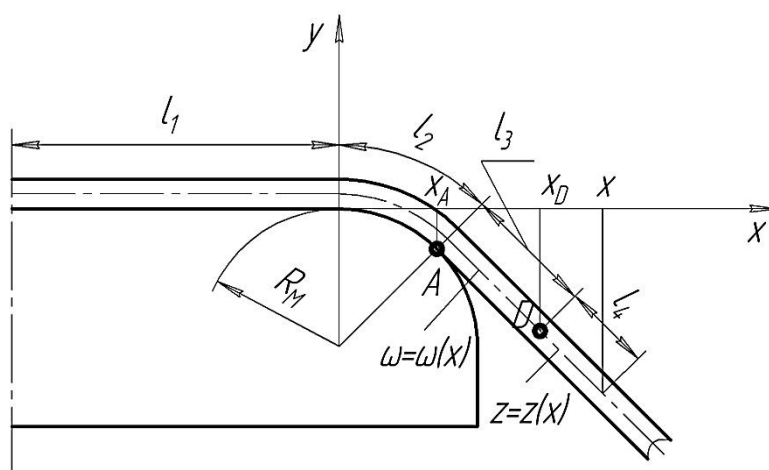


Рис. 4. До визначення відстані від центру заготовки до перерізу із координатою  $x$

Потужність приводу, яка задовольняє крутний момент (8), визначається з формули:

$$N_{кр} = M_{кр} \cdot \omega = \frac{P_z \cdot \left( x_B + \frac{d}{2} - R_n \right) \cdot \pi \cdot n}{30}, \quad (9)$$

де  $n$  – швидкість обертання оправки, об/хв.

Враховуючи те, що швидкість осьової подачі визначається згідно з:

$$v_n = \frac{h \cdot n}{60}, \quad (10)$$

де  $h$  – осьова подача валка за один оберт. Потужність преса, який забезпечує зусилля  $P_y$ , розраховується за формулою:

$$N_{oc} = \frac{P_y \cdot h \cdot n}{60}. \quad (11)$$

Найбільш небезпечною зоною, щодо руйнування зовнішніх шарів, є зона початку згинання  $A$  (рис. 5), тому що на ділянці  $AB$  внаслідок формування бурта додатково накладаються поперечні напруження стиску, що пом'якшують напружено-деформований стан на ділянці порівняно із зоною  $A$ .

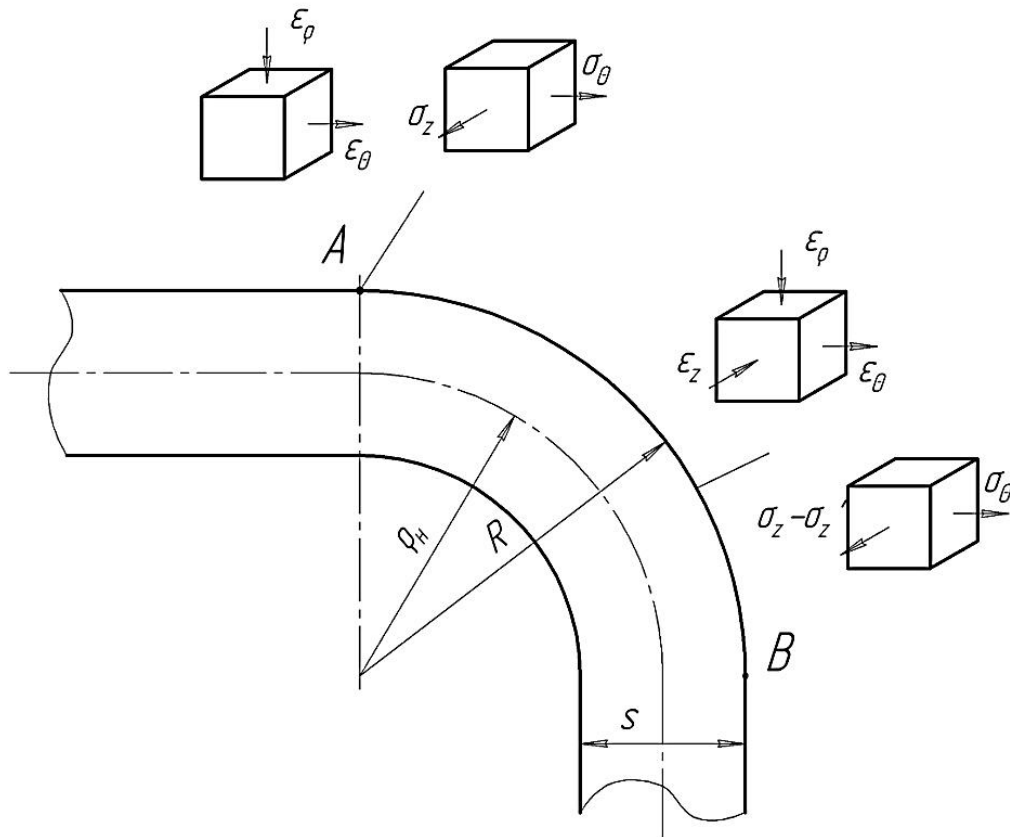


Рис. 5. Напружено-деформований стан в осередку згинання під час ротаційної витяжки

Згідно з [5] у зоні *A* напруження мають такі значення:

$$\sigma_\rho = 0; \tag{12}$$

$$\sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \sigma_m + A \cdot \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n \right]; \tag{13}$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left[ \sigma_m + A \cdot \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{\rho}{\rho_n} \right)^n \right]. \tag{14}$$

Тоді показник  $\eta$ , що характеризує жорсткість напруженого стану, дорівнює:

$$\eta = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta + \sigma_z}{\sigma_i} = \sqrt{3} \approx 1,732, \tag{15}$$

тобто він не залежить від радіуса згинання і є сталим протягом усього процесу згинання.

Колова деформація на зовнішніх волокнах при згинанні нейтральної поверхні на радіус  $\rho_n$  визначається таким чином:

$$\varepsilon_\theta = \frac{R - \rho_n}{\rho_n} = \frac{s}{2 \cdot \rho_n} = \frac{s}{2 \cdot r + s} = \frac{s}{2 \cdot R_{on} + s}. \tag{16}$$

Інтенсивність накопиченої деформації на зовнішніх волокнах в залежності від радіуса оправки визначається за формулою:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{3} \cdot s}{2 \cdot R_{on} + s} \leq \varepsilon_{*c} (\eta = 1,732), \quad (17)$$

де  $\varepsilon_{*c} (\eta = 1,732)$  – інтенсивність накопиченої деформації, яку може сприймати матеріал без руйнування при напружено-деформованому стані, який характеризується показником  $\eta = 1,732$ . Значення інтенсивності беремо із діаграми пластичності, що побудована у координатах  $\eta - \varepsilon_{*c}$ . Тоді мінімальний радіус оправки:

$$R_{on \min} = \frac{s}{2} \cdot \left( \frac{\sqrt{3}}{\varepsilon_{*c} (\eta = 1,732)} - 1 \right). \quad (18)$$

У роботі Баркая В. Ф. [6] досліджено напружено-деформований стан у бурті під час ротаційної витяжки. Згідно з цією роботою у бурті реалізується лінійний напружений та об'ємний деформований стани:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \sigma_\rho = 0; \\ \sigma_z &= -\sigma_s; \\ \varepsilon_z &= -\frac{2B}{D}; \\ \varepsilon_\theta &= \varepsilon_\rho = -\frac{\varepsilon_z}{2} = \frac{B}{D}, \end{aligned} \quad (19)$$

де  $B \approx \frac{D-d}{2}$  – ширина бурта.

Тоді показник жорсткості напружено-деформованого стану  $\eta$  дорівнює:

$$\eta = \frac{\sigma_\theta + \sigma_\rho + \sigma_z}{\sigma_i} = -1, \quad (20)$$

а накопичена на периферії бурта інтенсивність деформацій:

$$\varepsilon_i = \frac{3}{2} \cdot |\varepsilon_z| = \frac{3B}{D} \leq \varepsilon_{*c} (\eta = -1). \quad (21)$$

З формули (21) отримаємо вираз для визначення максимальної ширини бурта за умови збереження суцільності периферійних ділянок:

$$B_{\max} = \frac{D \cdot \varepsilon_{*c} (\eta = -1)}{3}. \quad (22)$$

Максимальна ширина бурта за умови протікання стійкого процесу без гофроутворення визначається за методикою, запропонованою у роботі [7]:

$$B_{\max} = \left( \frac{1}{\cos \sqrt{-c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}}} - 1 \right) \cdot \frac{D}{2}, \quad (23)$$

$$\text{де } c_1 = \frac{19}{30} \cdot c_2; \quad c_2 = \frac{1}{\frac{631}{3150} + \frac{4 \cdot \sigma_s \cdot D^2 \cdot (1 - \nu)^2}{20 \cdot E \cdot s^2}}.$$

За максимальне значення ширини бурта беруть менше з обрахованих за формулами (22) та (23) значень.

## ВИСНОВКИ

Зроблено аналіз існуючих методик визначення енергосилових параметрів процесу ротаційної витяжки.

На основі математичної моделі згинання смуги змінної ширини та товщини матрицею та пуансоном, що мають значні радіуси заокруглень, запропоновано методику визначення повного зусилля деформування та його складових, які необхідні при проектуванні обладнання для процесу ротаційної витяжки.

Запропоновано методику визначення граничних параметрів процесу формування зовнішніх буртів: мінімального радіуса заокруглення оправки та максимальної ширини бурта.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Козлов Ю. И. Изготовление днищ на обкатных машинах / Ю. И. Козлов. – М. : Машиностроение, 1982. – 190 с.
2. Козлов Ю. И. О расчете усилий при изготовлении днищ обкаткой роликом / Ю. И. Козлов, С. Т. Лин, Е. И. Воробьев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1967. – № 9. – С. 20–22.
3. Сунь Хун-Шоу. Боковое усилие, возникающее при изготовлении днищ методом обкатки / Сунь Хун-Шоу // Кузнечно-штамповочное производство. – 1959. – № 10. – С. 22–23.
4. Кононенко В. Г. Автоматизированная токарно-давальная обработка / В. Г. Кононенко, Н. И. Могильный. – М. : НИИинформтяжмаш, 1969. – № 12-68-15. – 54 с.
5. Краєвський В. О. Математична модель згинання смуги / В. О. Краєвський, В. М. Михалевич, В. А. Матвійчук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук.праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 103–108.
6. Баркая В. Ф. Формоизменение листового металла / В. Ф. Баркая. – М. : Металлургия, 1976. – 264 с.
7. Баркая В. Ф. Определение критической ширины фланца при ротационной обкатке цилиндрических оболочек / В. Ф. Баркая, Ф. И. Рузанов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1973. – № 10. – С. 15–17.

Краєвський В. О. – канд. техн. наук, доц. ВНТУ;

Матвійчук В. А. – д-р техн. наук, проф. ВНАУ;

Михалевич В. М. – д-р техн. наук, проф. ВНТУ;

Старушок Н. Ю. – студент ВНТУ.

ВНТУ – Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

ВНАУ – Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця.

E-mail: vkraevsky@mail.ru.