

Є. І. Шевчук¹
К. І. Шевчук¹
І. О. Сивак¹

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНУ ЗМІНИ СИЛИ, ЩО ДІЄ НА ЗАГОТОВКУ ЗІ СТОРОНИ ДЕФОРМУВАЛЬНОГО РОЛИКА ПІД ЧАС РОТАЦІЙНОЇ ВИТЯЖКИ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

¹Вінницький національний технічний університет

Виконані дослідження напружено-деформованого стану в зоні контакту деформувального ролика із заготовкою при ротаційній витяжці осесиметричних деталей експериментально-розрахунковим методом. Установлено величину та закономірності зміни сили, діючої на заготовку, за якої забезпечується виготовлення заготовки заданої геометричної форми і без локальних стоншень.

Ключові слова: напруження, деформації, ротаційна витяжка, осередок деформації, крива течії.

Вступ та постановка задачі

У різних галузях машинобудування знайшли широке застосування осесиметричні вироби, які виготовляються ротаційною витяжкою. Вивчення процесу ротаційної витяжки ускладнюється наявністю локальної пластичної деформації і об'ємним характером напруженого стану матеріалу в осередку деформації [1].

В умовах дрібносерійного виробництва ротаційну витяжку виконують на токарних верстатах. В більшості випадків для виготовлення якісних деталей методами ротаційної витяжки на токарних верстатах використовують спеціальне обладнання, яке дозволяє змінювати величину навантаження в залежності від положення деформувального інструмента та ступеня пластичної деформації матеріалу заготовки.

Метою роботи є визначення величини та закону зміни сили, що діє на заготовку зі сторони деформувального ролика під час ротаційної витяжки.

Методика та результати досліджень

В роботі для розрахунку величини силового навантаження на ролик в залежності від ступеня пластичної деформації експериментально-розрахунковим методом визначено напружено-деформований стан в зоні контакту деформувального ролика із заготовкою, а для забезпечення необхідного закону зміни сили навантаження на ролик використано пристрій з електрогідравлічним приводом [2]. Для забезпечення необхідного переміщення використовувався спеціальний електрогідравлічний привід [3].

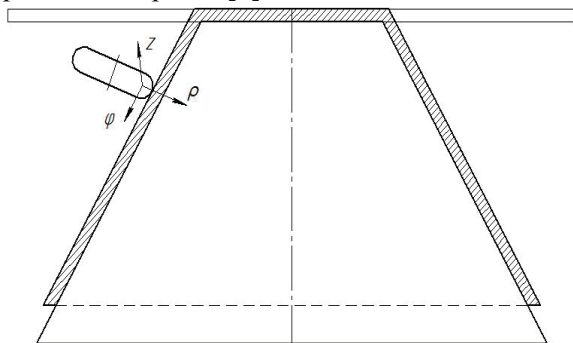


Рис. 1. Циліндрична система координат

В осередку деформації вибрано циліндричну систему координат (рис. 1). Для осесиметричного напруженого стану в циліндричній системі координат рівняння рівноваги мають такий вигляд [4—6]:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{\sigma_{\rho} - \sigma_{\phi}}{\rho} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0.$$

де σ_{ρ} , σ_{ϕ} , σ_z — радіальна, тангенціальна і осьова компоненти тензора напружень; $\tau_{\rho z}$, $\tau_{z\rho}$ — дотичні напруження; ρ , z , ϕ — координати точки в циліндричній системі координат.

Компоненти девіатора напружень розраховували за співвідношеннями деформаційної теорії пластичності:

$$\begin{aligned}\sigma_\rho - \sigma &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} \varepsilon_\rho; & \sigma_\phi - \sigma &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} \varepsilon_\phi; \\ \sigma_z - \sigma &= \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} \varepsilon_z; & \tau_{\rho z} &= \frac{1}{3} \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} \gamma_{\rho z}.\end{aligned}\quad (2)$$

де $\sigma = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\phi + \sigma_z}{3}$ — середнє напруження, σ_u — інтенсивність напружень, $\varepsilon_\rho, \varepsilon_\phi, \varepsilon_z, \gamma_{\rho z}$ — компоненти тензора деформацій.

Для експериментального дослідження процесу ротаційної витяжки конічних деталей використовували листові заготовки діаметром $d = 80$ мм і товщиною $\delta = 1,0$ мм із сталі 10 та АД1. Як робочий інструмент, який забезпечує задану геометрію та розміри деталі, використовували деформувальний ролик та конічну оправку. Кут робочого конуса оправки $\alpha_{on} = 30^\circ$, а діаметр верхньої частини, до якої кріпиться заготовка, дорівнює $d_0 = 32$ мм. Діаметр ролика $D_p = 140$ мм, радіус робочої поверхні ролика $R = 4$ мм.

Для визначення компонентів тензора деформацій на поверхню листової заготовки наносили координатну сітку у вигляді кіл та радіальних прямих, проведених від центру заготовки з кутовим інтервалом $\alpha_{on} = 15^\circ$.

Компоненти тензора деформацій у вибраній системі координат (див. рис. 1) розраховували за формулами

$$\varepsilon_\phi = \ln \frac{r}{r_0}; \quad \varepsilon_z = \ln \frac{r_\partial}{r_{\partial_0}}.\quad (3)$$

де r_0, r — відстань у радіальному напрямі від центра осі обертання заготовки до певної точки поверхні, відповідно, до та після пластичного деформування, r_{∂_0} — початковий радіус точки на поверхні заготовки, r_∂ — радіус кола, отриманого від перерізу конічної поверхні готової деталі площиною перпендикулярною до осі обертання. Площина проходить через точку з початковим радіусом r_{∂_0} .

Компоненту тензора деформацій ε_ρ знаходили з умови нестисливості

$$\varepsilon_\rho = -\varepsilon_\phi - \varepsilon_z.$$

Інтенсивність деформацій ε_u розраховували за формулою

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\phi)^2 + (\varepsilon_\phi - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\rho)^2 + \frac{3}{2} \gamma_{\rho z}^2}.\quad (4)$$

Отримані значення ε_u використані для визначення інтенсивності напружень σ_u за кривою течії, яку апроксимували залежністю:

— для сталі 10 і залежністю

$$\sigma_u = 796 \varepsilon_u^{0,3};$$

— для сплаву алюмінію АД1

$$\sigma_u = 136 \varepsilon_u^{0,22}.$$

Для визначення радіального напруження σ_ρ використовувалось перше рівняння системи (1), після інтегрування якого отримали:

$$\sigma_\rho = \sigma_\rho^{\text{пов}} - \int_{R+\delta}^{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial z} + \frac{S_\rho - S_\phi}{\rho} \right) d\rho,\quad (5)$$

де $\sigma_r^{\text{пов}}$ — радіальне напруження на вільній поверхні листової заготовки, яка в кінці процесу витяжки прилягає до оправки.

Вважаємо, що на вільній поверхні листової заготовки $\sigma_r^{\text{пов}} = 0$, а радіус ρ змінюється від $\rho = R + \delta = 5$ мм, для точок, які знаходяться на зовнішній поверхні заготовки, до $\rho = R = 4$ мм, для точок зони контакту робочої поверхні ролика з поверхнею заготовки.

Для визначення нормального напруження σ_z використовували друге рівняння системи (1)

$$\sigma_z = \sigma_z^0 - \int_0^a \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{S_r - S_\phi}{\rho} \right) dz, \quad (6)$$

де $2a$ — довжина великої осі еліпса плями контакту.

Для визначення σ_z^0 в точці з координатою $\rho_0 = 4$ мм використовували відому в цій точці величину радіального напруження $\sigma_r(\rho_0)$ і, відповідно, необхідну для визначення σ_z^0 величину середнього напруження

$$\sigma = \sigma_r(\rho_0) - S_r(\rho_0).$$

Тоді

$$\sigma_z^0 = S_z(\rho_0) + \sigma_r(\rho_0) - S_r(\rho_0), \quad (7)$$

де $S_z(\rho_0)$, $S_r(\rho_0)$ — компоненти девіатора напружень в точці з координатами ρ_0 .

Нормальні напруження σ_ϕ визначили з умови пластичності

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{rz}^2}. \quad (8)$$

Отримані залежності компонент тензора напружень σ_r , σ_ϕ , σ_z від початкового радіуса r_0 точки поверхні листової заготовки в кінці процесу ротаційної витяжки для заготовок із сталі 10 і АД1 показані на рис. 2.

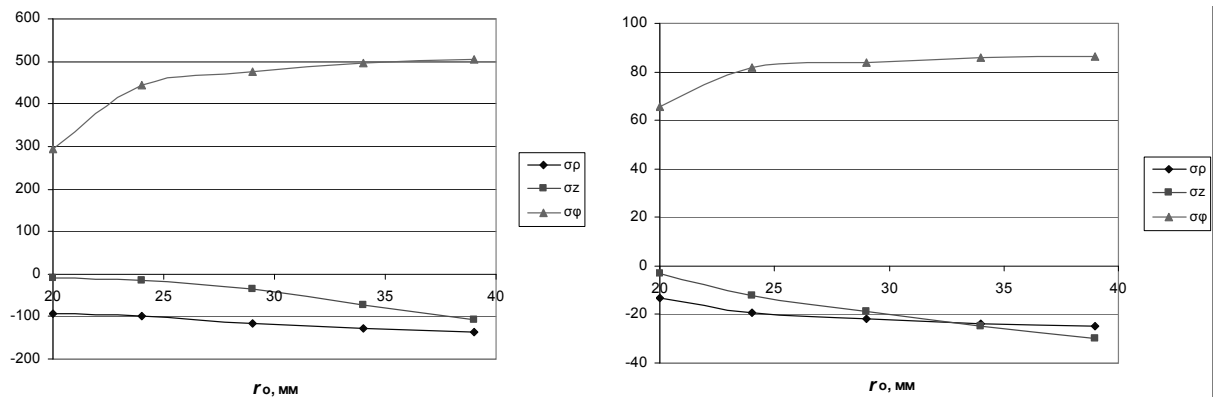


Рис. 2. Залежності компонент тензора напружень σ_r , σ_ϕ , σ_z від початкового радіуса r_0

З наведених залежностей випливає, що компоненти тензора напружень зростають зі збільшенням відстані точки поверхні від осі симетрії заготовки.

Отримані значення радіального напруження σ_r були використані для розрахунку величини навантаження на деформувальний ролик та закону його зміни в залежності від ρ в кінці процесу ротаційної витяжки. Змінювати величину навантаження на ролик в кінці процесу витяжки за знайденими залежностями, необхідно для того, щоб поверхня отриманої деталі мала правильну геометричну форму, яка задається формою робочої поверхні оправки та щоб не було локальних стоншень. Середню величину навантаження визначали за формулою

$$P = \sigma_r \cdot A, \quad (9)$$

де A — площа плями контакту.

Для визначення величини плями контакту використали формули з роботи М. С. Дрозда [7], які для розрахунків розмірів великої $2a$ і малої $2b$, півосей еліпса контакту (рис. 3) мають такий вигляд:

$$a = \sqrt{R_{11}(2 \cdot h_a + \alpha_y) - h_a^2}; \quad (10)$$

$$b = \sqrt{R_{21}(2 \cdot h_b + \alpha_y) - h_b^2}, \quad (11)$$

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 O центра залишкової вм'ятини до найбільш віддаленої від нього (без врахування напливу) точок контуру еліптичної (в плані) площадки контакту; α_y — зворотнє пружне зближення контактуючих тіл.

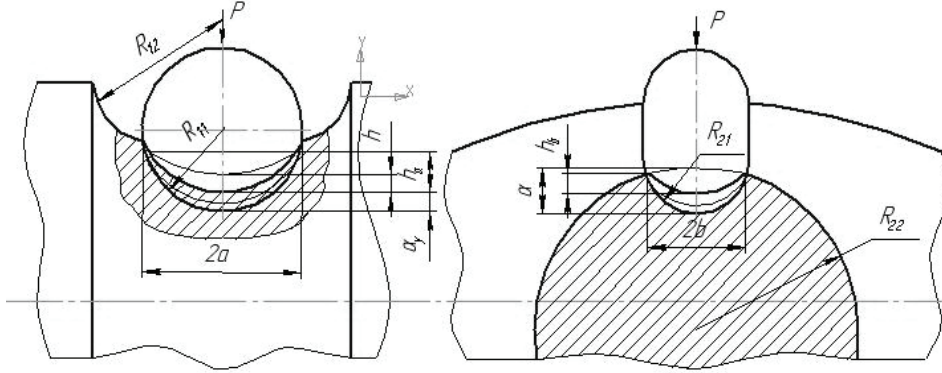


Рис. 3. Схема пружнопластичного контакту тіл довільної кривизни

Повне зближення в пружнопластичному контакті заготовки з інструментом α складається з двох складових: залишкового зближення h , рівного глибині відновленої вм'ятини і пружного зближення α_y , яке зникає після зняття навантаження внаслідок того, що зникає пружна деформація заготовки і інструменту (кульки або ролика), таким чином:

$$\alpha = h + \alpha_y. \quad (12)$$

В роботі М. С. Дрозда, [7] для розрахунку α_y отримано формулу

$$\alpha_y = \frac{n_a}{2} \sqrt[3]{\frac{9\pi^2}{4} (k_1 + k_2)^2 P^2 \left[\frac{1}{R_{11} \left(1 + \frac{2h_a}{\alpha_y}\right)} + \frac{1}{R_{21} \left(1 + \frac{2h_b}{\alpha_y}\right)} \right]}, \quad (13)$$

в якій невідомими геометричними параметрами є геометричні параметри вм'ятини α_y , h_a і h_b

$$h_a = \frac{\pm 2R_{12}h - R_{11}\alpha_y - h^2}{2(\pm R_{12} + R_{11} - h)}; \quad (14)$$

$$h_b = \frac{\pm 2R_{22}h - R_{21}\alpha_y - h^2}{2(\pm R_{22} + R_{21} - h)}, \quad (15)$$

де знаки «плюс» і «мінус», є знаки кривизни робочих поверхонь ролика і деталі.

Числовий аналіз показує, якщо у формулах (14) і (15) не враховувати h і h^2 , то похибка розрахунку α_y за формулою (13) не буде перевищувати (3...5 %). Тоді можна записати

$$h_a \approx \frac{\pm 2R_{12}h - R_{11}\alpha_y}{2(R_{11} \pm R_{12})}; \quad (16)$$

$$h_b = \frac{\pm 2R_{22}h - R_{21}\alpha_y}{2(R_{21} \pm R_{22})}. \quad (17)$$

Значення n_a , що входить у формулу (13) можна знайти за таблицею, наведеною в роботі М. С. Дрозда [7], в залежності від величини відношення A/B .

За геометричні параметри A і B , які характеризують головні кривизни контактуючих тіл, беруть, відповідно, меншу і більшу з таких двох сум

$$A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{11}} \pm \frac{1}{R_{12}} \right); \quad (18)$$

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{21}} \pm \frac{1}{R_{22}} \right). \quad (19)$$

Пружні сталі k_1 і k_2 , що входять в формулу (13), визначаються за формулами

$$k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1}; \quad k_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2}, \quad (20)$$

де μ_1, μ_2, E_1, E_2 — коефіцієнти Пуассона і модулі пружності матеріалів інструмента та заготовки.

В рівняння (13) входить тільки одна невідома α_y , яку можна визначити методом послідовних наближень.

Таким чином, авторами знайдені всі величини необхідні для розрахунку значень a і b за формулами (10) і (11). З використанням величин a і b розрахована площа плями контакту A і величини P за формулою (9). Отримані залежності сили P від радіуса r_0 для заготовок зі сталі 10 і алюмінієвого сплаву АД1 показані на рис. 4.

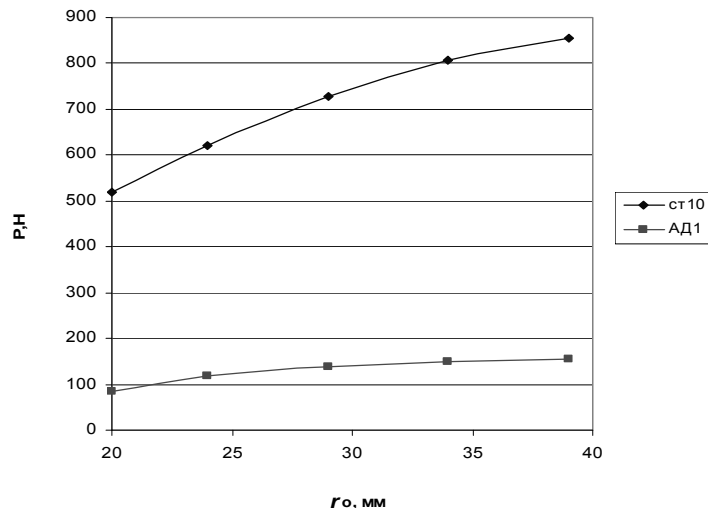


Рис. 4. Залежність сили P від початкового радіуса r_0

Висновки

Експериментально-розрахунковим методом визначено напружено-деформований стан в зоні контакту деформувального ролика із заготовкою при ротаційній витяжці осесиметричних деталей. Результати розрахунку використані для визначення величини і закону зміни сили навантаження на заготовку в кінці процесу витяжки, що дозволило отримати деталі заданої геометричної форми і без локальних стоншень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Могильный Н. И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках / Н. И. Могильный. — М. : Машиностроение, 1983. — 190 с.
2. Динамічні характеристики електрогідрравлічного слідкувального приводу з керуванням зусиллям на виконавчому органі / О. В. Дерібо, Ж. П. Дусанюк, С. В. Репінський, А. О. Парадний, В. Г. Пилявець // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2015. — № 4. — С. 118—123.
3. Лозінський Д. О. Ротационна витяжка осесиметричних деталей з використанням пропорційного електрогідрравлічного приводу / Д. О. Лозінський, І. О. Сивак, Є. І. Шевчук, В. Г. Пилявець // Вісник Хмельницького національного університету. — 2015. — № 4. — С. 21—24.
4. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. — М. : Наука, 1969. — 420 с.
5. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. — М. : Машиностроение, 1990. — 223 с.
6. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. — К. : Выща школа, 1983. — 175 с.
7. Дрозд М. С. Инженерные расчёты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. — М. : Машиностроение. 1986. — 224 с.

Рекомендована кафедрою технології та автоматизації машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 21.12.2015

Шевчук Євген Ігорович — аспірант кафедри технологій та автоматизації машинобудування, e-mail: Shevae_111@mail.ru;

Шевчук Катерина Ігорівна — студентка факультету інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії;

Сивак Іван Онуфрійович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри технологій та автоматизації машинобудування.

Вінницький національний технічний університет

Y. I. Shevchuk¹
K. I. Shevchuk¹
I. O. Syvak¹

Determination of Variation Law for Force Acting on the Blank from the Side of Deforming Roller during Rotational Drawing of Axisymmetric Parts

¹Vinnitsia National Technical University

The paper deals with investigation of stress-strain state in the zone of the deforming roller contact with the blank the process of rotational drawing of axisymmetric parts with the application of experimental-computational method. Such value of the loading force acting on the blank and regularities of its variation have been determined, which ensure obtaining the required geometric shape of the blank and without local thinning sections.

Keywords: stress, deformations, rotational drawing, deformation region, flow curve.

Shevchuk Yevhen I. — Post-Graduate Student of the Chair of Technologies and Automation of Engineering;

Shevchuk Kateryna I. — Student of the Department of Information Technologies and Computer Engineering;

Syvak Ivan O. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Technologies and Automation of Engineering

Е. И. Шевчук¹
Е. И. Шевчук¹
И. О. Сивак¹

Определение закона изменения силы, действующей на заготовки со стороны деформирующего ролика во время ротационной вытяжки осесимметричных деталей

¹Вінницький національний технічний університет

В работе выполнены исследования НДС в зоне контакта деформирующего ролика с заготовкой при ротационной вытяжке осесимметричных деталей экспериментально-расчетным методом. Установлены величина и закономерности изменения силы действующей на заготовку, при которой обеспечивается изготовление заготовки заданной геометрической формы и без локальных утончений.

Ключевые слова: напряжения, деформации, ротационная вытяжка, очаг деформации, кривая течения.

Шевчук Евгений Игоревич — аспирант кафедры технологий и автоматизации машиностроения, e-mail: Shevae_111@mail.ru;

Шевчук Екатерина Игоревна — студент факультета информационных технологий и компьютерной инженерии;

Сивак Иван Онуфриевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологий и автоматизации машиностроения