

## ОЦІНКА ДЕФОРМОВАНОСТІ ЗАГОТОВОК ПРИ ЗВОРОТНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

В роботі виконано оцінку деформованості заготовок при зворотному видавлюванні порожнистих циліндричних виробів. Проведено розрахунки використаного ресурсу пластичності заготовок базуючись на дослідженні напружено-деформованого стану. Пораховано розподіл використаного ресурсу пластичності по радіусу заготовки. Визначено з огляду на руйнування найнебезпечніші точки на заготовці. Встановлено, що використаний ресурс пластичності зростає зі зростанням відношення максимального радіуса заготовки до радіуса пуансона.

**Ключові слова:** використаний ресурс пластичності, зворотне видавлювання, напружено-деформований стан.

### Abstract

The paper evaluates the deformability of workpieces during the reverse extrusion of hollow cylindrical products. The calculations of the used plasticity resource of the workpieces based on the study of the stress-strain state were carried out. The distribution of the used plasticity resource along the radius of the workpiece was calculated. The most dangerous points on the workpiece were determined in terms of fracture. It was found that the used plasticity resource increases with an increase in the ratio of the maximum radius of the workpiece to the radius of the punch.

**Keywords:** used plasticity resource, reverse extrusion, stress-strain state.

Для оцінки деформованості заготовок під час зворотного видавлювання необхідна інформація про напружено-деформований стан і закон його зміни в процесі формозміни в пластичній області. Однак у більшості робіт розглянуто питання визначення зусилля зворотного видавлювання.

**Метою роботи** є проведення оцінки деформованості заготовок при зворотному видавлюванні порожнистих циліндричних виробів та визначення, базуючись на оцінці напружено-деформованого стану, найнебезпечніших, з огляду на руйнування, точок на заготовці.

Авторами роботи [1] отримано розрахункові методи, що дають змогу визначати накопичені деформації в пластичних зонах. У роботі [2] проаналізовано початкову стадію видавлювання порожнистих циліндричних виробів і дано пояснення фізичних закономірностей пластичної течії під час видавлювання. У цій роботі при визначенні напружено-деформованого стану (НДС) використано підхід описаний в роботі [1]. НДС є осесиметричним, тому рівняння рівноваги мають вигляд

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

де  $\sigma_\rho, \sigma_z, \sigma_\theta$  – нормальні напруження по осях  $\rho, z, \theta$  відповідно;  $\tau_{\rho z}$  – дотичне напруження.

Співвідношення між напруженнями і швидкостями деформацій

$$\sigma_\rho - \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u \dot{\epsilon}_\rho}{\dot{\epsilon}_u}, \quad \sigma_\theta - \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u \dot{\epsilon}_\theta}{\dot{\epsilon}_u}, \quad \sigma_z - \sigma = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u \dot{\epsilon}_z}{\dot{\epsilon}_u}, \quad \tau_{\rho z} = \frac{1}{3} \frac{\sigma_u \dot{\gamma}_{\rho z}}{\dot{\epsilon}_u}, \quad (2)$$

де  $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$  – середнє напруження;  $\sigma_u$  – інтенсивність напружень;  $\dot{\epsilon}_\rho, \dot{\epsilon}_\theta, \dot{\epsilon}_z$  – швидкості лінійних

деформацій по осях  $\rho, \theta, z$  відповідно;  $\dot{\gamma}_{\rho z}$  – швидкість деформації зсуву.

Компоненти швидкостей деформацій визначаються зі співвідношень

$$\dot{\epsilon}_\rho = \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho}, \quad \dot{\epsilon}_\theta = \frac{v_\rho}{\rho}, \quad \dot{\epsilon}_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}, \quad \dot{\gamma}_{\rho z} = \frac{\partial v_z}{\partial \rho} + \frac{\partial v_\rho}{\partial z}, \quad (3)$$

де  $U_\rho, U_\theta, U_z$  – компоненти вектора швидкості переміщення точки.

Інтенсивність швидкостей деформацій визначається формулою

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left(\dot{\varepsilon}_\rho - \dot{\varepsilon}_\theta\right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_\theta - \dot{\varepsilon}_z\right)^2 + \left(\dot{\varepsilon}_z - \dot{\varepsilon}_\rho\right)^2} + \frac{3}{2} \dot{\gamma}_{\rho z}}. \quad (4)$$

У пластичній області виконується умова нестисливості

$$\frac{\partial v_\rho}{\partial \rho} + \frac{v_\rho}{\rho} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

У першому наближенні вважатимемо, що виконується умова:

$$\sigma_u = \sigma_r. \quad (6)$$

Під час розв'язання задачі будемо використовувати наступні граничні умови:

– на верхній межі області пластичних деформацій ( $z = 0$ )

$$v_z = -v_0 \text{ при } 0 \leq \rho < 1, \quad v_z = \frac{v_0}{\frac{R^2}{r^2} - 1} \text{ при } 1 \leq \rho \leq (R/r). \quad (7)$$

– на осі симетрії –  $\rho = 0, v_\rho = 0$ , на стінці матриці –  $\rho = R/r, v_\rho = 0$ . (8)

В результаті розв'язання задачі отримано розподіл  $\eta$  по радіусу заготовки в небезпечній, з точки зору руйнування, зоні для  $\frac{R}{r} = \frac{14}{9}$ .

Результати розрахунків показника напруженого стану наведено на рис. 1.

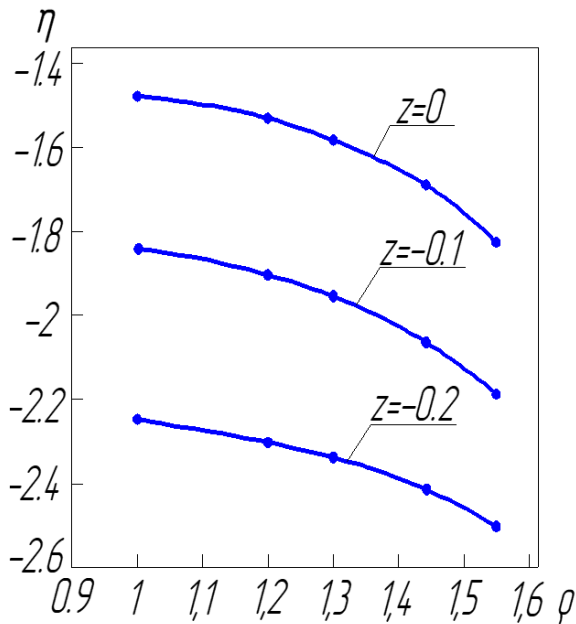


Рис. 1. Зміна показника напруженого стану  $\eta$  по радіусу заготовки  $\frac{R}{r} = \frac{14}{9}$

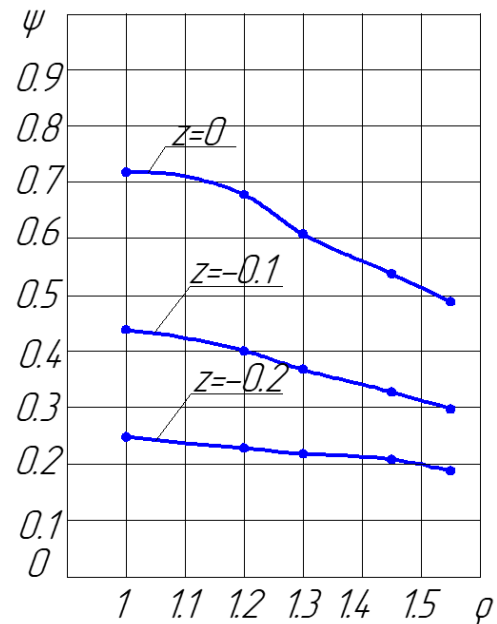


Рис. 2. Зміна використаного ресурсу пластичності  $\psi$  по радіусу заготовки при  $\frac{R}{r} = \frac{14}{9}$

Отриману інформацію про НДС і закон його зміни використовували для оцінки використаного ресурсу пластичності за критерієм (9) [3]:

$$\psi = \int_0^{e_u^*} n \frac{e_u^{n-1}}{\left[e_p(\eta(e_u))\right]^n} de_u, \quad (9)$$

де  $n = 1 + 0,2 \arctg d\eta/de_u$

Зміну показників  $\eta$  у процесі деформації залежно від ступеня деформації  $\epsilon_n$  використовували для розрахунку  $\psi$  за критерієм (9).

Використаний ресурс пластичності розраховували для випадку, коли  $R/r = 14/9$ . Результати розрахунку наведено на рис. 2.

Із аналізу залежностей  $\psi$  від  $\rho$  (рис. 2) випливає, що найнебезпечнішими з точки зору руйнування є точки заготовки з координатами  $\rho = 1, z = 0$ .

### Висновки

На основі розв'язання крайової задачі теорії пластичності та прикладної теорії деформованості для процесу зворотного видавлювання, для небезпечних, з огляду руйнування, точок заготовки, виконано оцінки використаного ресурсу пластичності ( $\psi$ ).

Встановлено розподіл  $\psi$  по радіусу заготовки. З аналізу отриманих залежностей випливає, що найбільші значення  $\psi$  має в точках з координатами  $\rho = 1, z = 0$ . Значення  $\psi$  зростає зі зростанням відношення максимального радіуса заготовки до радіуса пуансона.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Огородніков В. А. Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором : [монографія] / В. А. Огородніков, І. Ю. Кириця, В. Є. Перлов. – Вінниця: – ВНТУ, 2015 – 164 с.

2. Сивак І.О. Оцінка zdeформовуваності заготовок в процесах холодного зворотного видавлювання / І. О. Сивак, І. Ю. Кириця, Н. В. Нікітіна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 6. – С. 92–96.

3. Кириця І. Ю. Феноменологічні критерії руйнування // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 3. – С. 75-81.

**Кириця Інна Юріївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри опору матеріалів, теоретичної механіки та інженерної графіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: slk-vin@ukr.net, kyrytsya@vntu.edu.ua, тел. +380679843705.

**Kyrytsya Inna Y.** – PhD, Assistant Professor of Materials Resistance, Theoretical Mechanics and Engineering Graphics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: slk-vin@ukr.net, kyrytsya@vntu.edu.ua, tel. +380679843705.