

# ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИЙ ПІДХІД ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПРИ ПОБУДОВАНІ ДІАГРАМ ПЛАСТИЧНОСТІ

Вінницький національний технічний університет

## Анотація

Використано феноменологічний підхід для визначення показника напруженого стану для діаграми пластичності. Показник сформовано на основі параметра відносного гідростатичного тиску з використанням феноменологічних коефіцієнтів впливу відносного головного напруження.

**Ключові слова:** показник напруженого стану, діаграма пластичності, феноменологічний підхід.

## Abstract

A phenomenological approach was used to determine the stress state index for the plasticity diagram. The indicator is formed on the basis of the relative hydrostatic pressure parameter using the phenomenological coefficients of the influence of the relative principal stress.

**Keywords:** stress indicator, plasticity diagram, phenomenological approach.

## Вступ

Пластичність металів залежить від ряду чинників, серед яких, окрім природи самого матеріалу, основними є термомеханічні параметри самого процесу: вид напруженого стану, температура, швидкість деформації, історія деформації і ін. У більшості робіт, присвячених дослідженням деформовності, вид напруженого стану, що характеризує пластичність, визначається показником жорсткості напруженого стану [1, 2]. Сучасна теорія деформовності використовує феноменологічні підходи, що ґрунтуються як на фізично змістовних моделях, так і на описових [1–5]. Безсумнівною перевагою такого підходу є отримання досить загальної моделі із достатньою для інженерних розрахунків точністю.

**Метою роботи** є використання феноменологічного підходу до визначення показників напруженого стану при побудовані діаграм пластичності.

## Результати дослідження

Досить плідний підхід запропонував В. А. Бабічков, формуючи показник напруженого стану у вигляді відносного гідростатичного тиску, який можна переставити з коефіцієнтом нормування у вигляді

$$\eta = c \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i},$$

де  $\sigma_i$  – інтенсивність нормального напруження  $c$  – коефіцієнт нормування;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – головні нормальні напруження.

Зручно прийняти  $c = 1$ , тоді в умовах розтягування  $\eta = 1$ , стискування  $\eta = -1$ , кручення  $\eta = 0$ , двовісного рівномірного розтягування  $\eta = 2$  і стискування  $\eta = -2$ .

У загальному випадку об'ємного напруженого стану, для однозначної його ідентифікації, слід застосовувати додатково інші параметри виду напруженого стану, наприклад, параметр Надаї–лоде

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

Зручність застосування саме цих параметрів в парі полягає в тому, що параметр Надаї–лоде не залежить від гідростатичного тиску, а показник  $\eta$  – це гідростатичний тиск, що нормується по дійс-

ній напрузі. Таким чином, діаграма пластичності (тобто вже поверхня руйнування) буде виражена функцією  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ .

Втім, в літературі зустрічаються і інші показники, що мають теоретичне і експериментальне обґрунтування. Так, М. А. Зайковим пропонується показник у вигляді відносної першого головного напруження [2].

$$\eta_1 = a_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$$

Я. Б. Фрідман вважає, що пластичність залежить від параметра [3]

$$\eta_2 = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}},$$

де  $\sigma_{\max}$  – приведенне нормальне розтягуюче напруження.

Відзначимо показники, що враховують третій інваріант тензора і девіатора напружень, –  $I_3(T_\sigma)$  і  $I_3(D_\sigma)$  відповідно.

По В. А. Огороднікову [2]

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sigma_i}$$

По Т. Вербіцкому [4]

$$\xi = \frac{27 I_3(D_\sigma)}{2 \sigma_i^3}$$

Замість параметра Надаї–лоде з успіхом можна використовувати показники  $\xi$  або  $\chi$ . Перевагою використання параметра  $\chi$  є можливість на основі плоскої діаграми пластичності будувати об'ємну з урахуванням поправки без проведення експериментів, що показано в роботах.

Показники напруженого стану, введені Г. Д. Делем, враховують характер в'язкого руйнування – зрізом і відривом [5].

Так, вважається, що руйнування шляхом відриву залежить від показника

$$\beta = \frac{1 - s_{sf} \cdot \eta}{\sigma_1 / \sigma_i}$$

і може спостерігатися тільки при позитивній першій головній напрузі  $\sigma_1$ .

Руйнування шляхом зрізу ставиться у відповідність з параметром

$$\theta = \frac{1 - k_{sf} \cdot \eta}{\tau_{\max} / \sigma_i},$$

де  $\tau_{\max}$  – максимальна дотична напруга,  $s_{sf}$ ,  $k_{sf}$  – коефіцієнти моделі.

Таким чином, Г. Д. Дель розділив показники напруженого стану залежно від характеру руйнування.

Феноменологічний підхід створює перспективи щодо побудови діаграми пластичності з використанням нового показника напруженого стану, що використовується в якості аргументу діаграми пластичності [6].

Встановлено, що вплив головних нормальних напружень є неоднаковим щодо накопичення пошкоджень в матеріалі, який пластично деформується. Причому, даний вплив залежить від виду матеріалу, що дає можливість формування моделі пластичності, зокрема для матеріалів з різною реологією. Таким чином, нами отримано показник напруженого стану

$$\zeta = \frac{k_1 \sigma_1 + k_2 \sigma_2 + k_3 \sigma_3}{\sigma_i} = k_1 a_1 + k_2 a_2 + k_3 a_3,$$

де  $a_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$ ,  $a_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_i}$ ,  $a_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_i}$  – відносні головні напруження,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  – коефіцієнти впливу від-

носного головного напруження на пластичність металу.

Діаграма пластичності  $e_p(\zeta)$  описується експоненціальними функціями і має суттєво кращу кореляцію з експериментом ( $R_{adj}^2 = 0,9...0,97$ ), ніж традиційна діаграма пластичності  $e_p(\eta)$  ( $R_{adj}^2 = 0,6...0,8$ ). Також  $e_p(\zeta)$  відповідає граничним умовам – при всебічному стискуванні пластичність дорівнює нескінченності, при всебічному розтягуванні – нулю.

Знайдено конкретний вигляд апроксимувальної функції  $e_p(\zeta)$ :

$$e_p = d \cdot \exp(-q \cdot \zeta) = d \cdot \exp(-q \cdot (a_1 + \bar{k}_2 a_2 + \bar{k}_3 a_3)),$$

де  $\bar{k}_2 = \frac{k_2}{k_1}$ ,  $\bar{k}_3 = \frac{k_3}{k_1}$  – коефіцієнти впливу відносного головного напруження, які виражені в частках стосовно коефіцієнта  $k_1$  першого головного напруження  $a_1$ .

За даними, отриманими при дослідженні алюмінієвих, титанових сплавів та вуглецевих сталей найбільший вплив на пластичність спричиняє  $a_1 = \sigma_1/\sigma_i$ , друге за силою впливу –  $a_3 = \sigma_3/\sigma_i$ , тобто  $\bar{k}_1 > |\bar{k}_3| > |\bar{k}_2|$ . З'ясовано, що для досліджених матеріалів коефіцієнт  $\bar{k}_3$  становить  $-0,76...-0,85$ . Також отримано, що показник  $\zeta$  приймає значення в межах  $1...1,2$ ; отже, похідна  $d\zeta / de_i$  буде близька до нуля, тому її впливом на пластичність металу можна знехтувати.

Незручність використання показника  $\zeta$  полягає в його унікальності для кожного матеріалу, що робить неможливим порівняння діаграм  $e_p(\zeta)$  для різних металів на одному рисунку, на відміну від звичайної діаграми пластичності.

## Висновки

Використання феноменологічного підходу дозволило отримувати діаграми пластичності  $e_p(\zeta)$  для процесів, що протікають в області додатних гідростатичних напружень, залежно від шляхів деформації і виду матеріалу, що в свою чергу уточнює значення використаного ресурсу пластичності металу до 2-х разів. В результаті це дозволяє зменшити (до 50%) виробничий брак для процесів, режими яких порашовані за граничними деформаціями в'язкого руйнування або розширити технологічні можливості пластичної формозміни.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.
2. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – К. : Вища школа, 1983. – 176 с.
3. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. Ч. 1. Деформация и разрушение / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с.
4. Calibration and evaluation of seven fracture models / T. Wierzbicki, Y. Bao, Y. –W. Lee, Y. Bai // International Journal of mechanical Sciences. – 2005. – V. 47. – P. 719–743.
5. Dell H. CrachFEM–A Comprehensive Approach For The Prediction Of Sheet Metal Failure / H. Dell, H. Gese, G. Oberhofer // AIP Conference Proceedings. – 2007. – V. 908, May 17. – P. 165–170.
6. Грушко А.В. Карты материалов в холодной обработке давлением : монография / А. В. Грушко. – Винница : ВНТУ, 2015. – 348 с.

**Грушко Олександр Володимирович** — професор кафедри ОМПМ, доктор технічних наук, професор, Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, e-mail: [grushko1alex@gmail.com](mailto:grushko1alex@gmail.com).

**Hrushko Oleksandr** — Prof. of Materials Strength and Applied Mechanics Department, Doctor of Technical Sciences, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [grushko1alex@gmail.com](mailto:grushko1alex@gmail.com).