

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ПЛАСТИЧНОСТІ ТА ФАКТОРИ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА АНОМАЛЬНЕ ПІДВИЩЕННЯ ПЛАСТИЧНОСТІ В ЗОНІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі наведені особливості розрахунку однієї з функцій матеріалу - діаграми пластичності (що формує технологічну карту матеріалу – паспорт матеріалу), яка відображає властивості матеріалу в залежності від ступеня деформації і схеми напруженого стану.

Показано, що «аномальне» підвищення пластичності при зростанні показника напруженого стану пояснюється впливом трьох факторів: градієнта деформацій, історії деформування і третього інваріанта тензора напружень.

Ключові слова: граничні деформації, градієнт деформацій, історія деформування, тензор напружень, тензор деформацій, діаграма пластичності.

Abstract

In this work the features of the calculation of one of the functions of the material - the plasticity diagram (forming the technological map of the material (passport of the material)) are presented, which displays the properties of the material depending on the degree of deformation and the stress state scheme.

It is shown that the “abnormal” increase of plasticity with an increase in the stress state index is explained by the influence of three factors: the gradient of deformations, the history of deformation and the third invariant of the stress tensor.

Keywords: ultimate deformations, deformations gradient, deformation history, stress tensor, deformation tensor, plasticity diagram.

В сучасних феноменологічних критеріях руйнування, які отримали застосування в задачах обробки металів тиском, використовують експериментальні дані у вигляді функцій – характеристик матеріалу. Діаграма пластичності є однією з функцій, що дозволяє в подальшому сформувати, так звану, технологічну карту матеріалу (паспорт матеріалу).

Діаграми пластичності отримують випробуванням матеріалів на розтяг, стиск, кручення або комбінації зазначених видів випробувань. При випробуваннях на розтяг, стиск, кручення або розтяг спільно з крученням необхідно, щоб було збережено сталість безрозмірних показників напруженого стану. Такими показниками, які отримали широке застосування в теорії деформованості є:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{3\sigma}{\sigma_i}, \quad (1)$$

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_i}, \quad (2)$$

де $I_1(T_\sigma)$, $I_3(T_\sigma)$ – відповідно перший і третій інваріанти тензора напружень;

$I_2(D_\sigma)$ – другий інваріант девіатора напружень;

σ_1 , σ_2 , σ_3 – головні напруження;

σ – середнє напруження;

σ_i – інтенсивність напружень.

Експериментально побудовані криві $e_p(\eta, \chi)$

$$e_p = \int d\varepsilon_{ij} \quad (3)$$

апроксимують і отримані функції називають діаграмами пластичності [1, 2]. Під час проведення експериментів необхідно дотримуватись умови $\eta = const, \chi = const$.

Однак, зазначена умова сталості показника напруженого стану в процесі випробування часто не виконується. Шлях деформування частинок матеріалу $\eta (e_i)$, наприклад, при розтягу може змінюватися від $\eta = 1$ (одновісний розтяг) до $\eta > 2$ (двовісний розтяг). Як показано в роботі [3] гранична деформація виявляється залежною від історії деформування і в деяких випадках перевищує величину $e_p (\eta = 0)$ (кручення), що суперечить фізичним уявленням.

Крім того, як показано в роботі [3] при розтягу зразків з матеріалів, руйнуванню яких передують локалізація і деформація у вигляді «шийки» на величину $e_p (\eta = 1)$ впливає об'ємність схеми напруженого стану. Як показник напруженого стану в роботі [3] запропонований показник (2), що враховує вплив третього інваріанта тензора напружень. У цій же роботі показано, що $I_3 (T_\sigma)$ впливає на пластичність $e_p (\eta = 1)$. В області зміни показника $1 \geq \eta \geq -2$ на діаграму впливає третій інваріант тензора напружень. В області $1 > \eta > 0$ третій інваріант підвищує пластичність (в порівнянні з діаграмою пластичності, побудованої в умовах $I_3 (T_\sigma) = 0$) (рис. 1).

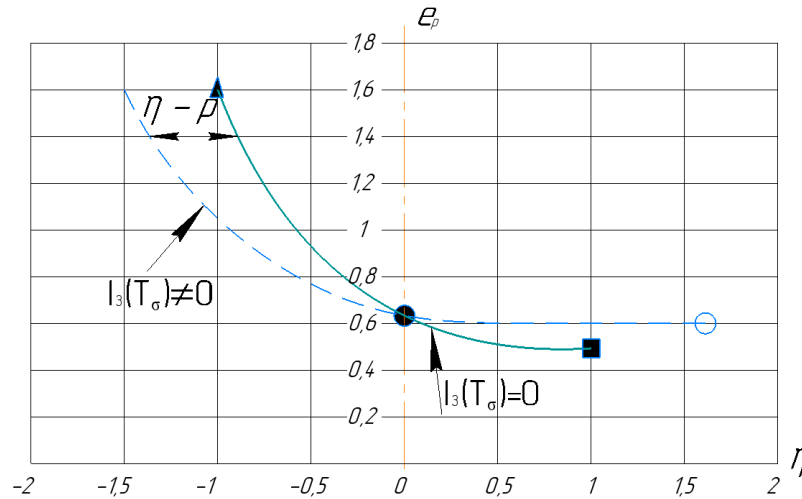


Рис. 1 – Діаграма пластичності сталі 20

■ – розтяг; ▲ – стиск; ● – кручення; ○ – $\eta = 1,55$

---- $I_3 (T_\sigma) \neq 0$; — $I_3 (T_\sigma) = 0$

Як показано в роботі [3] при постійному показнику напруженого стану градієнт деформацій підвищує пластичність.

На основі обробки, отриманих експериментальних даних в роботі [4] виходячи з теорії дифузії дислокацій і припущення про те, що при $\eta = const$ інтенсивність деформацій пропорційна щільності дислокацій, запропоновано наступне рівняння

$$e_p = b \exp(\beta t) + \frac{4}{3} \frac{\frac{\partial e_i}{\partial x} \int_{x=l} \sqrt{Dt}}{\sqrt{\pi}} \quad (4)$$

Залежність (4) перевірена експериментами: $\beta t = 2,0816$, $Dt = 16,81 \text{ мм}^2$, $b = 0,0095$.

$$e_p = 0,5(\text{grad } e_i)^{0,31} \quad (5)$$

або

$$\text{grad } e_i = \exp \left(\frac{\ln \frac{e_p}{0,5}}{0,31} \right). \quad (6)$$

Отримані результати дають можливість врахувати вплив градієнта деформацій при побудові діаграми пластичності.

Найбільша неоднорідність напружено-деформованого стану виявляється також при такому виді випробувань як кручення ($\eta = 0$).

При сталості показника напруженого стану ($\eta = 0$) можна реалізувати досліди на кручення зразків діаметром $d = 20, 15, 10, 7,5, 5$ мм.

Вздовж твірних циліндричних зразків за допомогою штангенциркуля проводили повздовжню риску. Після руйнування на інструментальному мікроскопі вимірювали кути нахилу гвинтових ліній поблизу місця руйнування. Ступінь деформації визначали за

$$e_p = \frac{\text{tg} \alpha}{\sqrt{3}}. \quad (7)$$

Вимірювали також діаметр зразка і довжину робочої частини до і після руйнування. В даному випадку ці параметри практично не змінювалися. Отже, кручення в чистому виді не було, тобто виникали осьові стискаючі напруження. Проте, як показано в роботі [5] вони на два порядки менше дотичних напружень і видовження зразків практично було відсутнє. Отже, гіпотеза плоских перетинів виконується $\varepsilon_z(z) = \text{const} \cong 0$, $\sigma_z \cong 0$.

При крученні $\text{grad } e_i = \frac{de_i}{dr} \cdot \frac{1}{e_{i\text{max}}} = \frac{d\gamma}{dr} \cdot \frac{1}{\gamma_{\text{max}}}$, тобто при радіусі $r = 4$ мм,

$$\text{grad } e_i = \frac{1}{r} = 0,25 \cdot \frac{1}{\text{мм}}.$$

Таким чином, в даній роботі розглянуті особливості, що виникають при побудові діаграм пластичності в умовах таких випробувань, як одновісний розтяг, а також кручення.

На прикладі сталі Ст 3, випробуваної в умовах розтягу, в роботах [6, 7] нами було запропоновано алгоритм побудови діаграм пластичності в інтервалі зміни показника η від нуля до двох.

Слідуючи роботі [6] радіус шийки визначали за формулою

$$R = \frac{l^2 + 4h^2}{8h}. \quad (8)$$

Показник напруженого стану розраховується за Бріджменом з урахуванням підходу, запропонованого в роботах [6, 7]

$$\eta = 1 + 3 \ln \left(1 + \frac{d_{kp}}{4} \cdot \frac{1}{R} \right). \quad (9)$$

В роботах [6, 7] пропонується розрахунок граничної деформації e_p^* проводити за формулою

$$e_p^* = 2 \ln \frac{d_0 \cdot 2,22}{d_{uu} + d_{cm}}, \quad (10)$$

де d_{cm} – діаметр циліндричного зразка в місці рівномірної стійкої деформації.

Розрахунок за формулою (10) занижує пластичність, що відповідає фізичним уявленням про падіння пластичності зі збільшенням показника η .

Дано обґрунтування можливості такого розрахунку на основі викладеного вище підходу щодо впливу трьох факторів на пластичність – градієнта деформацій, історії деформування і третього інваріанта тензора напружень.

У розглянутому прикладі розтягу циліндричних зразків зі сталі Ст 3 в області локалізації деформації (в шийці) градієнт деформацій завищує пластичність на величину $\Delta e_i \approx 0,11$, історія деформування – на величину $\omega = \ln \frac{e_p(\eta)}{e_p(\eta = const)} = 1,12 \dots 1,14$, третій інваріант $I_3 (T_\sigma)$ завищує пластичність на 10 – 12 %.

Розрахунок фактично граничної деформації дає результат

$$e_p^\phi = e_p [1 - (0,11 + 0,13 + 0,11)] = 1,27 [1 - 0,35] = 0,8255. \quad (11)$$

Розрахунок за формулою (10) дає задовільну збіжність з розрахунком за (11) $e_p^* = 0,975$.

Висновки

В роботі розглянуто особливості розрахунку граничних деформацій при побудові діаграм пластичності в умовах локалізації деформації.

«Аномальне» підвищення пластичності при зростанні показника напруженого стану пояснюється впливом трьох факторів: градієнта деформацій, історії деформування і третього інваріанта тензора напружень. Сумарне значення завищення граничної деформації становить 35%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Del G.D. Plasticity of metal subjected to complex loading / Del G.D., Ogorodnikov V.A., Spiridonov L.K. // *Izv. Uchebn. Zaved. «Mashinost.»* – 1974 – №12. – Р. 22 – 26.
2. Огородников В. А. Карты материалов в процессах обработки металлов давлением/ Огородников В. А., Деревенько И. А., Побережный М.И. // *Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: «Машиностроение»* – 2011 - №52. – С. 62-67.
3. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением/ Огородников В. А. – К.: Вища школа. Головное изд – во, 1983. – 175 с.
4. Огородников В. А. Зависимость пластичности металлов от градиента пластичности деформаций / Огородников В. А., Сивак И. О. // *Изв. АН СССР. Серія: «Металлы»* – 1978 – №6. – С. 70-74.
5. Дель Г.Д. Технологическая механика / Дель Г.Д.– М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
6. Кириця І.Ю. Особливості розрахунку параметрів напружено-деформованого стану та побудови діаграм пластичності в зоні локалізації деформації під час розтягу циліндричних зразків // *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* – 2014. – № 2. – С. 101 – 107.
7. Огородников В. А. Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором : [монографія] / Огородников В. А., Кириця І.Ю., Перлов В.Є. – Вінниця: – ВНТУ, 2015 – 164 с.

Кириця Інна Юрївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, Вінницький національний технічний університет, e-mail: slk-vin@ukr.net, тел. +380679843705.

Kyrytsya Inna Y. – PhD, Assistant Professor of Materials Resistance and Applied Mechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: slk-vin@ukr.net, tel. +380679843705.