

УДК 621.774

О. В. Нахайчук, д. т. н., проф.;**В. А. Огородніков**, д. т. н., проф.;**В. І. Музичук**, к. т. н., доц.;**І. А. Деревенько**

ДІАГНОСТУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ ЕКСПЕРТИЗ ТА ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Визначено підходи до діагностування механічних характеристик матеріалів, а також методики визначення параметрів їх технологічного паспорту на основі феноменологічної теорії деформовності.

Визначення вказаних характеристик дозволяє без проведення трудомістких експериментальних досліджень проводити вибір матеріалів для процесів холодного пластичного деформування, а також дає можливість прогнозування технологічної спадковості заготовок на різних етапах їх формування.

Традиційні уявлення про механічні характеристики матеріалу в механіці деформівного твердого тіла викладаються в дисциплінах пружного циклу таких як «Опір матеріалів», «Теорія пластичності», «Теорія міцності», «Динаміка і міцність машин», «Будівельна механіка машин» і в дисциплінах, назва яких починається зі слова «міцність», наприклад, «Міцність корабля», «Міцність будівельних споруд» тощо.

В теорії обробки металів тиском розглядаються пластичні деформації (кінцеві деформації) та стандартні механічні характеристики, такі як границя течії $\sigma_{0,2}$, границя пружності $\sigma_{пр}$, границя пропорційності $\sigma_{пш}$, границя міцності $\sigma_{мц}$, а також характеристик пластичності — відносне залишкове подовження $\delta = \frac{\ell_i - \ell_0}{\ell_0} 100\%$, відносне залишкове звуження $\psi_{пш} = \frac{A_0 - A_{пш}}{A_0} 100\%$. Вказа-

них величин недостатньо для опису механіки процесів обробки металів тиском.

Для оцінки напружено-деформованого стану заготовок, оброблюваних тиском, та оцінки використаного ресурсу пластичності необхідно знати сертифікатні (стандартні) механічні характеристики матеріалу, а також мати інформацію про механічні властивості оброблюваних матеріалів.

В останні роки властивості матеріалів у вигляді функцій знаходять широке застосування в технічних експертизах та у моделюванні процесів обробки металів тиском і становлять основу нової дисципліни — «Експериментальна механіка машин». Такими універсальними механічними характеристиками матеріалів є функції, що відображають властивості матеріалу в залежності від ступеня деформації (здатність до зміцнення), схеми напруженого стану, історії деформування. Зазначені уявлення про матеріал знайшли своє відображення в роботах кінця минулого сторіччя, про розвиток феноменологічної теорії деформовності [1, 2, 3], в яких відображені такі функції матеріалу:

1) крива течії матеріалу в координатах — інтенсивність напружень σ_u , інтенсивність деформації e_u , (накопичена інтенсивність деформації \bar{e}_u);

2) діаграма пластичності в координатах — гранична ступінь деформації e_p (накопичена інтенсивність деформації \bar{e}_u до моменту руйнування), показник напруженого стану $\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}$;

3) діаграма стійкості в координатах — ступінь деформації до появи «шийки» $e_{ст}$, показник напруженого стану η ;

4) криві Баушингера в координатах — коефіцієнт Баушингера $\beta = \frac{(\sigma_u)'}{\sigma_u}$, (де $(\sigma_u)'$ — напруження текучості після зміни напрямку деформування; σ_u — напруження текучості до розвантаження), попередній ступінь деформації в одному напрямку (на початку розтягу до σ_u , потім стиск до початку текучості σ_u);

5) градувальний графік — твердість (HV , HB , HRC , H_T) у залежності від інтенсивності напружень, інтенсивності деформацій $HV = f(\sigma_u, e_u)$;

6) залежність твердості від питомої потенціальної енергії $HV = f(W_{\text{пит}})$.

Розглянемо детальніше основні методи визначення вказаних функцій матеріалів.

1. Побудова кривих течії досліджуваних сталей

Однією з найважливіших характеристик опору матеріалів пластичному деформуванню, що використовуються у технічних експертизах та проектуванні технологічних процесів обробки металів тиском, є діаграма деформування, або крива течії. Для ізотропного матеріалу з ізотропним зміцненням, як правило, криву течії будують за результатами випробувань на розтяг стандартних зразків (рис. 1). Перед випробуваннями на робочу частину зразків наносяться базові точки (див. рис. 1) вдавненням алмазної пірамідки на твердомірі під навантаженням 300 Н.

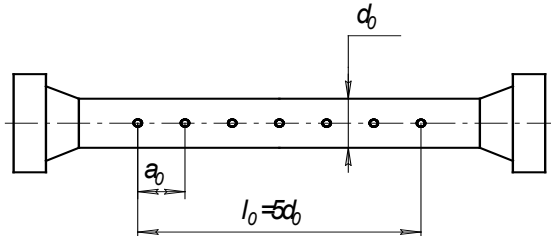


Рис. 1. Стандартний зразок, призначений для випробування на розтяг

У випробуваннях попередньо визначається стандартним методом початкова границя текучості досліджуваних матеріалів $\sigma_{0,2}$. З цією метою виготовляються циліндричні зразки, призначені для випробувань на одноосьовий стиск. Їх деформують до появи залишкової деформації $e_u \approx 0,002$

$$e_u = \ln \frac{h_0}{h_i} \quad (1)$$

Фіксуючи навантаження, при якому залишкова деформація $e_u \leq 0,002$, визначається умовна границя текучості

$$\sigma_u = \frac{P_{0,002}}{A_0} \quad (2)$$

де A_0 — площа циліндричного зразка:

$$A_0 = \frac{\pi d_0^2}{4} \quad (3)$$

де d_0 — діаметр зразка.

Потім циліндричні зразки, призначені для випробування на розтяг, деформують ступінчасто з повним подальшим розвантаженням для вимірювання відстаней між точками (див. рис. 1). Ці відстані вимірюються на інструментальному мікроскопі типу ММІ-2 з точністю ± 5 мкм. Рекомендуються навантажувати зразки до деформації $e_u \approx 0,005; 0,010; 0,020; 0,050; 0,070; 0,100; 0,150; 0,200; 0,250$ і т. д.

Момент початку появи шийки можна (з відхиленням $\sim 5\%$ за критичною деформацією) зафіксувати візуально за положенням покажчика на силовимірювальному пристрої преса, відзначаючи при цьому падіння навантаження після досягнення нею максимального значення P_{max} . Експериментальні дані обробляють за допомогою співвідношення

$$\sigma_u = \frac{P}{A} \quad (4)$$

де P — деформувальне зусилля; A — площа поперечного перерізу.

Інтенсивність деформації

$$(e_u)_{\text{рост.}} = \ln \frac{l}{l_0} \quad (5)$$

Іноді зручніше розраховувати деформації через діаметри d_0 і d зразка

$$(e_u)_{\text{рост.}} = \ln \frac{A_0}{A} = 2 \ln \frac{d_0}{d}. \tag{6}$$

Інтенсивність напруження розраховуємо за формулою

$$(\sigma_u)_{\text{рост.}} = P \exp(e_u)/A_0. \tag{7}$$

Досліджуванням на розтяг отримуються дані для побудови кривої течії лише за обмежених деформацій, рівних критичному значенню — $e_{\text{кр.}}$, що відповідає початку втрати стійкості пластичного деформування (утворенню шийки). Для побудови кривої $\sigma_u = \sigma_u(e_u)$ при накопиченій деформації $e_u > e_{\text{кр.}}$, використовуються різні наближені розв'язки задач про напружений стан точок, що лежать у найменшому поперечному перерізі шийки зразка із ізотропного матеріалу [4, 5].

Криві течії будуються з використанням результатів випробувань коротких циліндричних зразків на стиск і на розтяг (методика наведена в [1]). Ступінь деформації розраховується як середнє арифметичне за вимірами висоти зразка, площі поперечного перерізу, зміні розмірів квадратної сітки, нанесеної на бічну поверхню зразка пірамідкою твердоміра. Для зменшення впливу тертя на торці зразка наноситься графітове мастило, що складається із суміші графіту і гліцерину з прокладками із свинцю і латуні. На розтяг випробовуються стандартні десятикратні циліндричні зразки. Для прикладу, на рис. 2 показані побудовані криві течії на стиск і розтяг сталі 38Х2МЮА, яка використовується для отримання пари поршень-шатун аксіально-роторного поршневого насосу [6]. Квадратами позначені експериментальні дані на стиск, кружечками, перекресленими хрестом — розтяг, незафарбованими кружечками — розтяг на ділянці шийкоутворення. Для апроксимації використовували метод найменших квадратів. Виходячи з викладеного, можна зробити висновок про достатню близькість розташування кривих. Незначна розбіжність може бути пояснена впливом сил тертя у дослідженні на стиск.

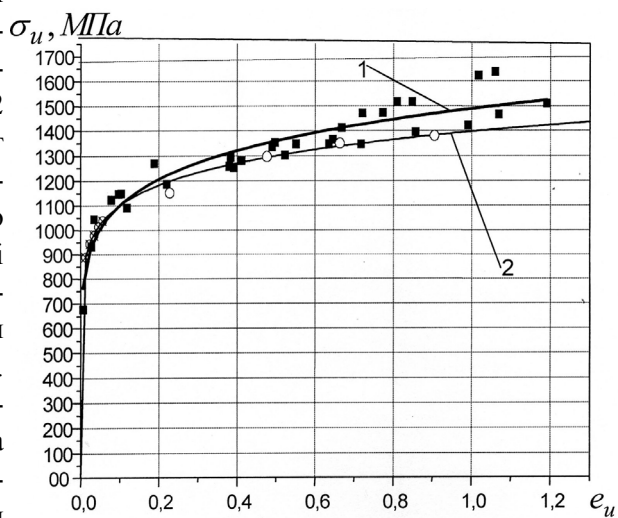


Рис. 2. Крива течії сталі 38Х2МЮА:
1 — стиск, 2 — розтяг

З метою використання кривої течії в розрахунках технологічних процесів обробки металів тиском її можна апроксимувати рівнянням

$$\sigma_u = Ae_u^n, \tag{8}$$

де A, n — коефіцієнти апроксимації, що мають фізичний зміст: $A = \sigma_u$ для $e_u = 1$, $n = e_{\text{кр}}$ — критична деформація при умовному максимальному напруженні.

Для побудови кривої течії в області великих деформацій ($e_u \gg (e_u)_{\text{кр.}}$) рекомендується проведення випробувань циліндричних зразків на стиск розмірами $h_0 = 15$ мм, $d_0 = 10$ мм до різних ступенів деформації $e_u = 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ аж до появи видимих неозброєним оком тріщин, що виникають, як правило, на екваторі бічної поверхні. Інтенсивність деформацій для ступенів деформації, які не викликають бочкоутворення, розраховуються за формулою

$$(e_u)_{\text{стиску}} = 2 \ln \frac{d}{d_0}. \tag{9}$$

Інтенсивність напружень визначається за формулою

$$(\sigma_u)_{\text{стиску}} = P/A_0 \exp(e_u), \tag{10}$$

За найменших ознак бочкоутворення накопичена інтенсивність деформацій

$$\bar{e}_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \int_0^{\delta} \sqrt{\left(\frac{d_z e}{d\delta}\right)^2 + \frac{de_z}{d\delta} \frac{de_\varphi}{d\delta} + \left(\frac{dt_\varphi}{d\delta}\right)^2} d\delta, \quad (11)$$

де параметр $\delta = \frac{h_0 - h}{h_0}$ характеризує стадію деформації циліндра і обчислюється після вимірювання висоти циліндра h_0, h до і після осадки.

Якщо бочкоутворенність незначна (осадка циліндра в умовах змащення контактних поверхонь) то накопичену інтенсивність деформації \bar{e}_u можна прийняти рівною інтенсивності деформації і розрахувати як

$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_z^2 + e_z e_\varphi + e_\varphi^2}, \quad (12)$$

де $e_z = \ln \frac{b_0}{b}$, $e_\varphi = \ln \frac{a_0}{a}$, a_0, b_0, a, b — початкові і поточні значення відстаней між відбитками на бічній поверхні зразків в окружному і вертикальному напрямках.

Інтенсивність напружень σ_u у цьому випадку розраховували за (10). Відповідно до деформаційної теорії пластичності

$$\sigma_z - \sigma = s_r = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} e_r, \quad (13)$$

тоді гідростатичний тиск

$$\sigma = -\frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} e_r, \quad (14)$$

де $G = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u}$ — січний модуль пластичності, тоді

$$\sigma = -G e_r, \quad (15)$$

а компоненти девіатора напружень S_z, S_φ відповідно рівні

$$S_\varphi = \sigma_\varphi - \sigma = G e_\varphi; \quad (16)$$

$$S_z = \sigma_z - \sigma = G e_z, \quad (17)$$

тоді компоненти тензора напружень

$$\sigma_z = G e_z + \sigma = G e_z - G e_r = G (e_z - e_r), \quad (18)$$

окружний компонент тензора напружень

$$\sigma_\varphi = G e_\varphi + \sigma = G e_\varphi - G e_r = G (e_\varphi - e_r). \quad (19)$$

Отже, знаючи січний модуль пластичності $G = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u}$ визначили всі головні напруження на бічній поверхні циліндра, що осаджується. При цьому

$$\sigma_1 = \sigma_\varphi = G (e_\varphi - e_z); \quad (20)$$

$$\sigma_2 = \sigma_r = 0; \quad (21)$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = G (e_z - e_r), \quad (22)$$

а інтенсивність напружень

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}. \quad (23)$$

2. Побудова діаграм пластичності сталей

Іншою, не менш важливою характеристикою матеріалу є діаграма пластичності, яка відображає залежність пластичності (накопиченої інтенсивності деформації) від показника напруженого стану (виду напруженого стану). Пластичність залежить від багатьох факторів, серед яких основними є термомеханічні параметри процесу: температура, швидкість деформування, схема напруженого стану. У холодній обробці тиском вплив схеми напруженого стану виявляється одним з найважливіших факторів, що визначає пластичність металів. Вплив схеми напруженого стану показано в класичних дослідженнях П. Бріджмена [7], у роботах Б. Д. Грозіна, Б. И. Береснева і ін. Напруження стиску збільшують пластичність, а напруження розтягу — знижують її. Повніше визначення залежності пластичності від виду напруженого стану описане в роботах С. І. Губкіна, В. А. Бабичкова, Л. Д. Соколова, Г. А. Смирнова–Аляєва, В. Л. Колмогорова та їх співробітників. У зазначених роботах за міру пластичності прийнята гранична деформація, обумовлена співвідношенням

$$e_p = \int_0^{\tau_p} \dot{\varepsilon}_u d\tau, \quad (24)$$

або величина, що відрізняється від e_p постійним множником.

Показники напруженого стану, від яких у холодній обробці тиском істотно залежить пластичність, звичайно складаються із інваріантів тензора напружень. Таким показником є показник С. І. Губкіна

$$\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{3}\tau_u}, \quad (25)$$

використаний В. А. Бабичковим у вигляді

$$\Pi = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{2}\sigma_u}, \quad (26)$$

Г. А. Смирновим–Аляєвим

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}, \quad (27)$$

В. Л. Колмогоровим:

$$\kappa = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3T} = \frac{\eta}{\sqrt{3}}. \quad (28)$$

Зазначимо, що показник у вигляді (26), приведений у роботах С. І. Губкіна, і показники (27) і (28) відрізняються лише постійним множником.

Перевагою показників (25—28) є таке. Вони складені з інваріантів тензора напружень, які враховують гідростатичний тиск, що має істотний вплив на пластичність, а також інтенсивність нормальних або дотичних напружень, що визначають пластичну течію матеріалу. Природно очікувати, що пластичність за простого навантаження залежить від деякого параметра, обумовленого величиною основних інваріантів тензора напружень. Тому з безлічі характеристик напруженого стану рекомендуються показники, зображені через інваріанти. Однак, слід зазначити, що перелічені показники не враховують можливий вплив третього інваріанта тензора напружень на пластичність.

Відносний вплив третього інваріанта тензора напружень на пластичність описаний в роботах [3, 8], у яких дослідженнями в камері високого тиску (до 20000 атм.) показана необхідність побудови діаграми пластичності в координатах

$$e_p = f(\eta, \chi), \quad (29)$$

де

$$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u}. \quad (30)$$

Таким чином, залежність граничної деформації e_p від показників, що характеризують напружений стан, називають діаграмою пластичності. Сучасні діаграми пластичності будують у координатах $e_p = f(\eta, \mu, \chi)$. Діаграми пластичності досліджуваних сталей будуються в координатах: гранична деформація e_p , показник напруженого стану η за методикою, викладеною в роботі [3]. Граничну деформацію при крученні можна визначити за формулою

$$e_p = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}}, \quad (31)$$

де α_p — кут між поздовжньою віссю зразка і рискою, нанесеною до дослідження уздовж твірної, який вимірювали поблизу місця руйнування на інструментальному мікроскопі з точністю до 1/60 град. Показник напруженого стану η кручення $\eta = 0$.

Крім того, зразки випробували на стиск аж до руйнування за методикою, викладеною в [3], при цьому граничну деформацію можна розрахувати за співвідношенням

$$e_p = 2 \ln \frac{h_0}{h}, \quad (32)$$

де h_0 — вихідна висота зразка, h — висота зразка після руйнування.

Показник напруженого стану $\eta = -1$ (якщо бочкоподібність відсутня). У випадку, якщо після стиску до появи макротріщини виявляється бочкоподібність зразку, показник η розраховується за формулою

$$\eta = 1 + 3 \ln \left(1 + \frac{d}{4R} \right). \quad (33)$$

3. Градувальні графіки: твердість—інтенсивність напружень—інтенсивність деформацій

Для визначення напружено-деформованого стану в області пластичної деформації необхідно знати розподіл інтенсивності напружень σ_u і інтенсивності деформацій e_u . У теорії пластичності інтенсивність напружень виражається через головні напруження за допомогою співвідношення (23), а інтенсивність деформацій — через головні деформації за залежністю

$$e_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_1 - e_3)^2}. \quad (34)$$

У роботі [9] показано, що твердість пластично деформованого тіла зв'язана з інтенсивністю напружень і інтенсивністю деформацій єдиною, що не залежить від виду напруженого стану, кривою, характерною для даного матеріалу. Тому, виявляється можливим за твердістю деформованого тіла визначити σ_u і e_u для різних напружених станів. У роботі [10] показано, що в умовах складного немоного навантаження твердість зв'язана з точністю гіпотези про єдину криву течії $\sigma_u = f(e_u)$ з інтенсивністю деформацій. В умовах складного немоного навантаження, коли виявляється ефект Баушингера (зменшення границі текучості в зв'язку зі зміною знака деформації), твердість «стежить» за інтенсивністю напружень. Твердість, у цьому випадку, є своєрідною «пам'яттю» матеріалу, її підвищення означає зміни напруження текучості. Пружна деформація не приводить до зміни твердості, тому твердість уже розвантаженого тіла «пам'ятає» про інтенсивність напружень у пластичній області до розвантаження. З метою визначення σ_u і e_u за твердістю будують градувальний (тарувальний) графік: твердість HV (за Віккерсом) — інтенсивність напружень σ_u , інтенсивність деформацій e_u , в умовах лінійного напруженого стану (звичайного розтягу або стиску циліндричних зразків в умовах змащення торців). В наших дослідженнях [6] градувальні графіки $HV = f(\sigma_u, e_u)$ будували для випробувань 7...10 циліндричних зразків з досліджуваних сталей висотою $h_0 = 15$ мм і діаметром $d_0 = 10$ мм. Поверхня торця циліндричних зразків не оброблялася після токарної обробки, з метою подальшого утримання змащення з осадкою до великих ступенів деформації. На бічну поверхню циліндричних

зразків наносили відбитки алмазною пірамідкою у вигляді ромба. Після чого зразки осаджували до різних ступенів деформації. Осадку здійснювали в обоймі, що виключає перекося зразків, на гідравлічному пресі ПММ-125, від величини $e_u = 0,002$ аж до руйнування. Стиск зразків проводили зі змащенням торців пастою з колоїдного графіту і гліцерину. При осадці гранична інтенсивність деформацій досягала значень, що перевищують 1,0; 1,2 і більше. Граничною вважали інтенсивність деформацій, за якої на бічній поверхні циліндра з'являлася тріщина, розміри якої перевищували $l_{mp} = 1$ мм. Кожний зразок доводили до різних ступенів деформацій, при цьому σ_u розраховували за формулою (10). Інтенсивність деформацій e_u розраховували за формулою (9). Після чого стиснуті до різних ступенів деформацій зразки розрізали вздовж меридіонального перерізу і поміщали в спеціальну обойму, яку разом із зразками заливали епоксидним клеєм. Отриману поверхню шліфували і полірували, довівши чистоту поверхні меридіонального перерізу зразків до шорсткості $p_a < 0,16$ мкм. Потім на твердомірі ТП-7Р-1 вимірювали твердість HV за Віккерсом алмазною пірамідкою відповідно до держстандарту 2999-59. Навантаження на індикатор складало 50 Н, витримка 12,5 с. На кожному зразку проводили по 10 вимірювань. Середнє цих вимірів відповідало числу твердості даного ступеня деформації.

4. Криві Баушингера. Фізична сутність ефекту Баушингера

Фізична сутність ефекту Баушингера полягає в зменшенні опору малим пластичним деформаціям (межі пружності і пластичності) після попередньої пластичної деформації протилежного знака. Це явище вперше було виявлено Баушингером у 1881 році у дослідженнях із залізом. В даний час на вивчення природи зазначеного ефекту спрямовано багато робіт. Експериментальні дані [11] показують, що зміцнення матеріалу при розтягу знижує по абсолютній величині границю текучості при стиску, і навпаки. Це явище називають ефектом Баушингера. Взагалі, при пластичному деформуванні метали набувають властивостей анізотропії, тобто механічні характеристики спочатку ізотропних матеріалів, наприклад, границя текучості, починає залежати від напрямку деформування. Ефект Баушингера є наслідком набутої анізотропії металів. На основі робіт з вивчення ефекту Баушингера, можна зробити такі висновки:

— ефект Баушингера існує в усіх металах, як у полікристалічному стані, так і в монокристалічному стані, незалежно від ступеня чистоти металу;

— ефект спостерігається як у найменших, так і у кінцевих пластичних деформаціях аж до відносної деформації 100 % і більше;

— з погляду мікроскопічних уявлень ефект Баушингера задовільно пояснюється дією орієнтованих мікронапружень, основну роль у виникненні яких відіграє розходження в опорі пластичному деформуванню області матриці і приграничних областей (границі зерен і блоків мозаїки).

З ряду робіт з вивчення ефекту Баушингера слід відначити дослідження Г. Б. Талипова [11]. Г. Б. Талиповим пропонується оцінювати ефект Баушингера, наприклад, при одноосьовому розтягу—стиску за таким співвідношенням

$$\beta = \sigma_d / \sigma(e_u), \quad (35)$$

де σ_d — умовна границя текучості при стиску зразка після його розтягу до деформації $\sigma(e_u)$; d — величина допуску на пластичну деформацію, %.

На рис. 3 показана розрахункова схема до визначення β . Тут σ_r — вихідна границя текучості, $\sigma_p(e_u)$ — діаграма розтягу. На рис. 4 показана залежність параметра β від e_u . Результати експериментальних досліджень показують, що параметр β інтенсивно зменшується при накопиченій деформації $e_u \leq 0,05$. При деформації $e_u > 0,05$ цей параметр для більшості металів залишається постійним і рівний деякому значенню β_m . У зв'язку з цим параметр можна розглядати як механічну характеристику металів, що характеризує їхню схильність до прояву деформаційної анізотропії.

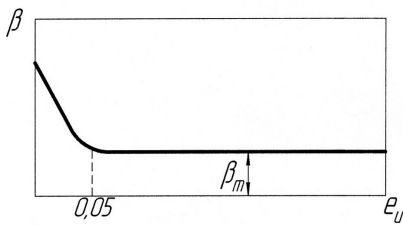


Рис. 3. Схема для визначення параметра β

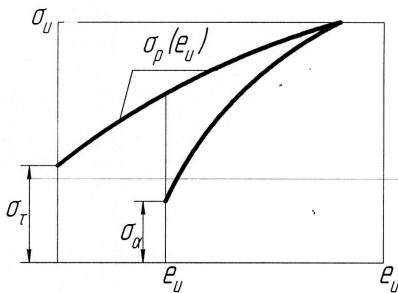


Рис. 4. Залежність параметра β від e_u

У роботі [12] зазначено, що величина β_m залежить від значення допуску на пластичну деформацію у визначенні умовної границі текучості σ_d . Однак, незалежно від вибору значення d , характер зміни параметра β , при цьому, залишається тим самим. Зі зменшенням значення d параметр β зменшується. У теоріях пластичності звичайно приймають $d = 0,2 \%$, що відповідає стандартній характеристиці матеріалу $\sigma_{0,2}$, названого умовною границею текучості. Ю. І. Янг і його учні експериментально довели правильність вибору зазначеного допуску, тому що тільки за технічного допуску 0,002 приблизно виконуються критерії пластичності Мізеса і Сен-Венана і вони виявляються неприйнятними для малих значень d . У зв'язку з зазначеним в роботі параметр β визначається за величиною границі текучості $\sigma_{0,2}$ для навантаження в напрямку, протилежному попередньому пластичному деформуванню. Експериментальні дані [11] свідчать про залежність β_m від виду напруженого стану, реалізованого при реверсивному пластичному деформуванні. Параметр β_m , отриманий дослідженням зразка у одноосьовому розтягу—стиску, відрізняється від параметра β_m , визначеного дослідженням тон-

костінних трубок на реверсивне кручення (просте зрушення). Встановлено також, що β_m є парною функцією параметра Надаї–Люде μ_σ , що характеризує вид напруженого стану.

Для оцінки параметра β зазвичай проводять дослідження циліндричних зразків на одноосьовий розтяг з подальшим стискуванням. При цьому партія стандартних зразків у кількості близько 30 шт. розбивається на 10 підпартій (по 3 шт.) з метою розтягу їх до накопичених деформацій $e_u = 0,005; 0,010; 0,015; 0,020; 0,030; 0,050; 0,07; 0,100; 0,150; 0,200$. Далі з цих пластично деформованих зразків вирізають короткі циліндричні зразки відповідно до Держстандарту і осаджують їх в осьовому напрямку до залишкової деформації $d = 0,2 \%$, фіксуючи при цьому по силовимірювачу дослідницької машини відповідного їй навантаження $P_{0,2}$.

Абсолютно точно стиснути зразок до деформації $e_u = 0,002$ практично не вдається, тому попередньо будують діаграму стиску для деформації $e_u \leq 0,005$ і за нею відповідно до стандартної методики визначають умовну границю текучості $\sigma_{0,2}$. Для вимірювання дуже малих переміщень застосовують, наприклад, механічні тензометри конструкції Гугенбергера [13].

Для розрахунків технологічних процесів можна використовувати залежність $\beta = \beta(e_u)$, апроксимовану у вигляді [14]

$$\beta = \begin{cases} 1 + (1 - \beta_m) [(e_u/0,05) - 2] e_u/0,05, & \text{якщо } e_u = 0,05; \\ \rho_m, & \text{якщо } e_u > 0,05. \end{cases} \quad (36)$$

5. Метод твердості

При холодному пластичному деформуванні метали зміцнюються. Це зміцнення нерівномірне в області пластичної деформації і є функцією координат. Зміцнення супроводжується підвищенням твердості деформованого металу, що дозволяє враховувати зміну величини зони зміцнення виміром твердості. Це можливо використовувати для експериментально-розрахункового визначення напружено-деформованого стану області пластичної деформації методом твердості. Метод оснований на припущенні Г. Д. Деля [9] про те, що твердість пов'язана з інтенсивністю дотичних напружень. Надалі було запропоновано визначати за твердістю інтенсивність деформацій, а отже з точністю гіпотези про єдину криву течії — інтенсивність напружень. У роботі [9, 10] показано, що залежність «інтенсивність напружень—твердість» побудована за результатами досліджень матеріалів в умовах лінійного напруженого стану і є єдиною для різних напружених станів. Це дозволяє визначити інтенсивність напружень у пластичній області за градуовальним графіком.

Висновки

1. Подано огляд традиційних та сучасних універсальних механічних характеристик матеріалів, методики діагностування властивостей для отримання функцій, що відображають їх залежності від ступеня деформації (здатності до зміцнення), схеми напруженого стану, історії деформування.

2. Описані методики можуть бути використані для формування технологічного паспорту матеріалів, які застосовуються в технічних експериментах та технологічних процесах холодного пластичного деформування. Використання феноменологічної теорії деформовності дозволяє ще на стадії проектування технологічних процесів оцінювати ресурс пластичності різних матеріалів, а також прогнозувати технологічну спадковість заготовок без проведення трудомістких експериментальних досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дель Г. Д. Технологическая механика. — М.: Машиностроение, 1978. — 174 с.
2. Колмогоров В. Л. и др. Пластичность и разрушение. — М.: Металлургия, 1977. — 336 с.
3. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. — К.: Выща школа, 1983. — 175 с.
4. Давиденков Н. Н., Спиридонова Н. И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. — 1945. — № 6. — С. 83—93
5. Дель Г. Д., Хван Д. В., Баланирев А. Н. Об устойчивости пластического растяжения анизотропно упрочняющихся тел // Изв. вузов. Машиностроение. — 1983. — № 7. — С. 8—9.
6. Огородников В. А., Музичук В. І., Нахайчук О. В. Механіка процесів холодного формозмінювання з однотипними схемами механізму деформації. Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. — 179 с.
7. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов. — М.: Издательство иностранной литературы, 1955. — 444 с.
8. Теорияковки и штамповки: Учебное пособие для студентов машиностроительных и металлургических специальностей вузов / Е. П. Унксов, В. Л. Колмогоров, В. А. Огородников и др.; Под общей редакцией Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 720 с.
9. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. — М.: Машиностроение, 1971. — 193 с.
10. Дель Г. Д., Огородников В. А. Изменение твердости металлов при немономтонном нагружении // Изв. Томского политехн. института. — 1976. — № 209. — С. 18—22.
11. Тальпов Г. Б. Исследование эффекта Баушингера // Известия АН СССР. Механика и машиностроение. — 1964. — № 6. — С. 131—137.
12. Тальпов Г. Б. Анализ экспериментальных данных по эффекту Баушингера и их теоретическое истолкование // Инженерный журнал. МТТ. — 1966. — № 2. — С. 108—113.
13. Пономарев С. Д. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. — М.: Машгиз, 1956. — Т. 1. — 884 с.
14. Хван Д. В. Повышение эффективности в обработке металлов давлением // Воронеж: Издательство Воронежского университета, 1995. — С. 224.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки

Надійшла до редакції 23.12.07
Рекомендована до друку 26.12.07

Огородников Віталій Антонович — завідувач кафедри опору матеріалів та прикладної механіки.

Вінницький національний технічний університет;

Нахайчук Олег Вікторович — завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін; **Музичук Василь Іванович** — доцент кафедри тракторів, автомобілів і технічного сервісу машин; **Деревенько Ірина Анатоліївна** — завідувач лабораторій кафедри загальнотехнічних дисциплін.

Вінницький державний аграрний університет