

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ПЛАСТИЧНОСТІ В ЗОНІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПІД ЧАС РОЗТЯГУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ

¹Вінницький національний технічний університет

Досліджено напружено-деформований стан під час розтягу зразків із матеріалів, що утворюють шийку. Запропоновано методи розрахунку параметрів напружено-деформованого стану та побудови діаграм пластичності, що враховують особливості локалізації деформації під час дослідження матеріалів на розтяг.

Ключові слова: діаграма пластичності, гранична деформація, показник напруженого стану.

Вступ

Питання про напружено-деформований стан під час розтягу зразків, що утворюють шийку складне і на сьогодні повністю не вирішене. Важливо знати величини напружень, які передують моменту руйнування зразка. Під час появи шийки розподіл напружень перестає бути одноосним і рівномірним.

Базуючись на тих чи інших припущеннях, побудовані наближені розв'язки. В роботах [1, 2] наведено один з таких розв'язків, який запропонований Н. Н. Давіденковим і Н. І. Спиридоною [3]. Цей розв'язок базується на трьох припущеннях: 1) матеріал нестисливий; 2) логарифмічні колова і радіальна деформації в точках найменшого поперечного перерізу шийки рівні між собою і постійні; 3) кривизна траєкторії одного з головних напружень в деякій точці найменшого поперечного перерізу шийки на відстані r від вісі може бути представлена у вигляді

$$\frac{1}{\rho} = \frac{r}{r_1 R}, \quad (1)$$

де r_1 — радіус найменшого поперечного перерізу шийки; R — радіус кривизни контуру шийки в точці найменшого поперечного перерізу.

Недоліком отриманих розв'язків є застосування гіпотези Хаара–Кармана про рівність колового напруження одному із головних напружень в меридіональній площині, що зводить задачу об'ємного напруженого стану до задачі про плоский напружений стан. В роботі [4] показано, що застосування вказаної гіпотези Хаара–Кармана для розрахунку напруженого стану в процесах, які супроводжуються осесиметричною деформацією, наприклад, осесиметрична осадка з тертям на торцях, осесиметричне пряме видавлювання, приводить до значних похибок. Значною мірою це стосується епюр колових напружень. Колові напруження за гіпотезою Хаара–Кармана є стискальними, а без врахування вказаної гіпотези — розтягувальними.

Застосування вказаної гіпотези виправдано лише у випадку оцінювання деформувальних зусиль [5], а також під час розв'язання деяких задач інженерної теорії пластичності [5]. Що стосується локального визначення компонент тензора напружень σ_{ij} в задачах осесиметричної пластичної деформації, то застосування гіпотези Хаара–Кармана некоректно.

Метою роботи є розроблення методів розрахунку напружено-деформованого стану та побудови діаграм пластичності, які враховували б особливості локалізації деформації під час дослідження матеріалів на розтяг.

Стан питання

В процесі розтягу циліндричних зразків із матеріалів, руйнуванню яких передують втрата стійкості пластичного деформування (утворення шийки), виникає низка проблем, пов'язаних зі строгим визначенням:

— накопиченої інтенсивності деформації до моменту руйнування (граничної деформації) ε_p :

$$\varepsilon_p = 2 \ln \frac{d_0}{d_{ш}}, \quad (2)$$

де d_0 — діаметр робочої частини зразка до деформування; $d_{ш}$ — діаметр поперечного перерізу зразка в зоні утворення шийки;

— показника напруженого стану η — відношення середнього напруження до інтенсивності напружень за Н. Н. Давіденковим і Н. І. Спиридоною [3]:

$$\eta = 1 + \frac{3d_{ш}}{4R}, \quad (3)$$

де R — поточний радіус кривизни меридіонального перерізу шийки зразка, або за П. Бріджменом [6]:

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

Вказані формули (2), (4) отримані в припущенні Хаара–Кармана про рівність колового напруження одному із головних напружень в меридіональній площині. Як показано в роботі [7], ця гіпотеза справедлива лише для визначення деформувальних зусиль. Під час оцінювання напружено-деформованого стану ця гіпотеза призводить до похибок невідомої величини.

Строгий розрахунок η і ε_p під час розтягу зразків, що утворюють шийку, дозволить встановити шлях деформування частинок матеріалу від початку втрати стійкості до повного руйнування зразка. Як відомо, шлях деформування (швидкість зміни η і ε_u) впливає на граничну до руйнування накопичену інтенсивність деформацій.

Як впливає із результатів розрахунків (рис. 1), гранична деформація, визначена за діаметром шийки в місці розриву, ε завищеною, і для деяких матеріалів досягає величини, що перевищує навіть величину ε_p під час зсуву, $\varepsilon_p(\eta=1) \geq \varepsilon_p(\eta=0)$, в той час як згідно з іншими експериментами із зростанням η пластичність знижується. Це не пов'язано зі зміною схеми напруженого стану в шийці. Оскільки в цій зоні виникає тривісний розтяг, то показник η зростає, що повинно було б привести до зниження пластичності.

Вказане аномальне підвищення пластичності може бути пов'язане, на думку автора, з трьома факторами. Одним із них є вплив градієнта деформації на пластичність. В роботі [8] показано, що за інших рівних умов (а саме у разі незмінності показника напруженого стану пластичність зростає). Там же показано, що якщо $\text{grad } \varepsilon_u$

змінюється в межах від 0 до 0,06, то пластичність зростає на $\Delta \varepsilon_u = 0,15$. Є підстави припускати, що в зоні шийки градієнт деформації може спричинити вплив на зростання пластичності. Другим фактором, що може спричинити вплив на підвищення пластичності в зоні шийки, є швидкість зміни показника напруженого стану, іншими словами — історія деформування. Так, в роботі [7] показано, що якщо $\frac{d\eta}{d\varepsilon_u} > 0$, пластичність зростає, а якщо $\frac{d\eta}{d\varepsilon_u} < 0$ — пластичність знижується.

Причину цього аномального підвищення пластичності варто також шукати в самому характері руйнування. Найбільші значення η набуває в центрі шийки на осі зразка. Відповідно до цього макротріщина зароджується саме в цьому місці. Так, в роботі Н. Н. Малініна [1] показано рентгеновський знімок шийки алюмінієвого круглого зразка безпосередньо перед руйнуванням, при цьому в центрі перерізу спостерігається макротріщина, яка не дійшла до країв контуру перерізу. Тому розрахунок граничної деформації за формулою (2) некоректний.

Відповідно до проведених спостережень [9] деформація визначена за діаметром шийки в момент її зародження, значно нижча визначеної за цим самим діаметром після розриву зразка. Тому дослідження на розтяг дозволяють отримувати достатньо достовірні дані лише в тих випадках,

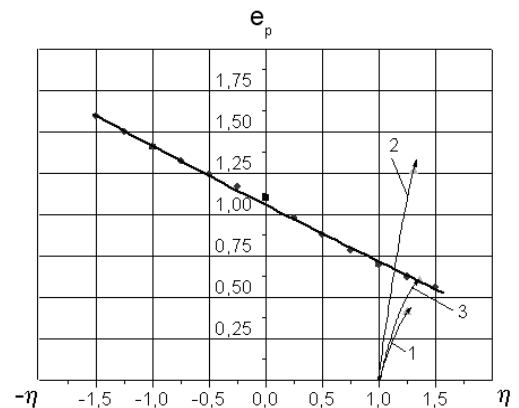


Рис. 1. Діаграма пластичності сталі Ст3 і шляхи деформування частинок матеріалу: 1 — розтяг зразка до появи критичної стійкості деформації; 2 — розтяг зразка до повного його руйнування; 3 — поява макротріщини перед руйнуванням зразка

коли перед руйнуванням не утворюється розвинена шийка. В зв'язку з цим для більш строгого визначення граничної деформації під час розтягу зразків, руйнуванню яких передують втрата стійкості пластичного деформування, необхідно мати експериментальні дані про розвиток і накопичення пошкоджень і виявити момент, що передують спонтанному розвитку макротріщини.

Експериментальні дослідження

Згідно з вищесказаним, у першу чергу, автором сформовано технологічний паспорт досліджуваного матеріалу. Для експериментів був вибраний матеріал сталь Ст3, оскільки цей метал пластичний через невеликий вміст вуглецю, і на зразках під час розтягу добре видно утворення шийки. В теорії обробки металів тиском, де розглядаються великі пластичні деформації (кінцеві деформації), таких стандартних механічних характеристик, як границя текучості — $\sigma_{0,2}$, границя пружності — $\sigma_{пр}$, границя пропорційності — $\sigma_{пц}$, границя міцності — σ_b , а також характеристик пластичності — відносне залишкове видовження — $\delta = \frac{l_i - l_0}{l_0} \cdot 100 \%$, відносне залишкове звуження —

$$\psi_{ш} = \frac{A_0 - A_{ш}}{A_0} \cdot 100 \%, \text{ далеко недостатньо для опису механіки процесів обробки металів тиском.}$$

Універсальними механічними характеристиками матеріалів є функції матеріалу, які відображають властивості матеріалу в залежності від ступеня деформації (здатність до зміцнення), схеми напруженого стану, історії деформування. Базуючись на відомих методиках [1, 7, 10], побудовані такі функції матеріалу:

1. Крива течії матеріалу в координатах інтенсивність напружень σ_u , інтенсивність деформацій e_u (рис. 2). З метою використання кривої течії в розрахунках технологічних процесів обробки металів тиском її апроксимували рівнянням Людвіга

$$\sigma_u = A e_u^n, \quad (5)$$

де A , n — коефіцієнти апроксимації. Для цього матеріалу коефіцієнти апроксимації $A = 840$ МПа, $n = 0,249$.

2. Діаграма пластичності в координатах «граничний ступінь накопиченої інтенсивності деформації до моменту руйнування e_p , — показник напруженого стану η ». Показник η дорівнює відношенню середнього напруження до інтенсивності напружень (рис. 3).

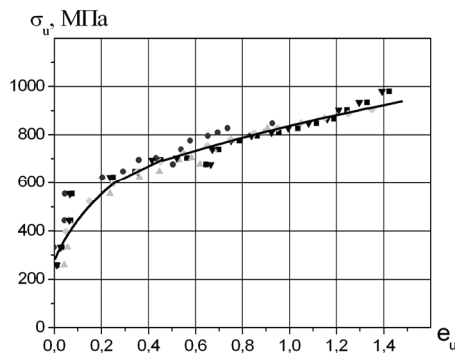


Рис. 2. Крива течії сталі Ст3:

- — експериментальні дані випробувань на тиск,
- — апроксимація згідно рівняння (5)

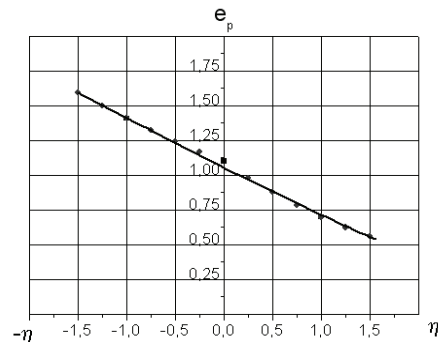


Рис. 3. Діаграма пластичності сталі Ст3

Суцільна лінія, показана на рис. 3, побудована згідно з апроксимацією, запропонованою В. А. Огородніковим: $\varepsilon_p(\eta) = \varepsilon_p(\eta=0) \exp(-\lambda_i \eta)$, де $i = 1,2$ (табл. 1).

Таблиця 1

Експериментальні дані пластичності сталі Ст3 для різних показників η , а також значення коефіцієнта λ_i

№ п/п	Матеріал	Граничні деформації			Коефіцієнти	
		$e_p(\eta=1)$	$e_p(\eta=0)$	$e_p(\eta=-1)$	λ_1	λ_2
1	сталь Ст3	0,697	1,098	1,408	0,454	0,249

3. Градувальний (тарувальний) графік — твердість в залежності від інтенсивності напружень, інтенсивності деформацій $HV = f(\sigma_u, \epsilon_u)$ (рис. 4).

Для точнішої оцінки величини η і ϵ_p провели експерименти, суть яких полягає у розтягу трьох зразків із маловуглецевої сталі (Ст3) до різних ступенів деформації (зр. № 1 — $\epsilon_1 = 2,56\%$; зр. № 2 — $\epsilon_2 = 15,92\%$; зр. № 3 — $\epsilon_3 = 20,92\%$) з вимірюванням всіх геометричних параметрів шийки.

Для розрахунку показника напруженого стану η необхідна інформація про поточний радіус кривизни меридіонального перерізу шийки зразка R (4). Однак визначення R практично не висвітлено в літературі, тому автором запропонована формула його розрахунку:

$$R = \frac{l^2 + 4h^2}{8h}, \tag{6}$$

де h — глибина впадини шийки; l — хорда.

Отримавши експериментальні дані з розтягу трьох зразків із маловуглецевої сталі (Ст3) до різних ступенів деформації, розраховали три значення R (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри в зоні шийкоутворення

№ зразка	l , мм	h , мм	$d_{ш}$, мм	$d_{ст}$, мм	R , мм
3 (10)	12	1,675	5,1	8	11,58
2 (11)	14	1,1	6,1	8	22,82
1 (13)	16	1	7,7	8,45	34

Таким чином, маючи значення $d_{ш}$ і R для різних ступенів деформації, побудовано графік залежності кривизни меридіонального перерізу зразка від діаметра в зоні шийкоутворення $v(d)$ (рис. 5). Для зручності використання графіка і формул, введено такі позначення:

$v = \frac{1}{R}$ — кривизна в меридіональному перерізі в зоні шийкоутворення.

На основі обробки експериментальних результатів отримана експоненціальна залежність

$$v = D \cdot \exp\left(-\frac{d_{ш}}{f}\right), \tag{7}$$

де $D = 1,318 \text{ мм}^{-1}$; $f = 1,86 \text{ мм}$.

Ця залежність дозволяє визначити v в будь-який момент деформування, вимірявши лише діаметр зразка $d_{ш}$ в зоні шийкоутворення.

Вказані експерименти дозволяють також оцінити значення $d_{ш}$ в формулах (2) і (4). Таким чином, під час розрахунку ϵ_p і η в формули (2) і (4) необхідно підставляти значення діаметра, який визначають в момент зародження макротріщини. В подальшому цю величину будемо позначати $d_{кр}$. Величина $d_{кр}$ відповідає моменту зародження макротріщини.

Згідно з експериментальними даними

$$d_{кр} = \frac{d_{ш} + d_{ст}}{2,22}, \tag{8}$$

де $d_{ст}$ — діаметр циліндричного зразка в зоні рівномірної стійкої деформації.

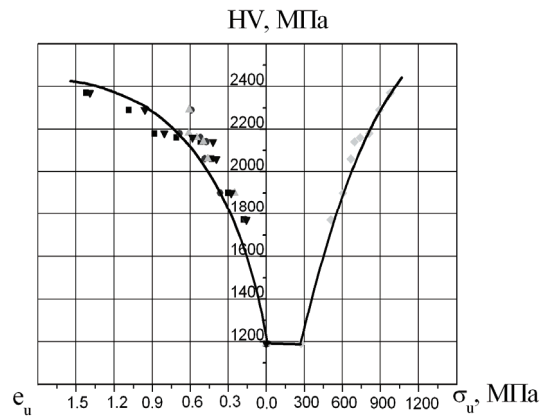


Рис. 4. Градувальний графік сталі Ст3

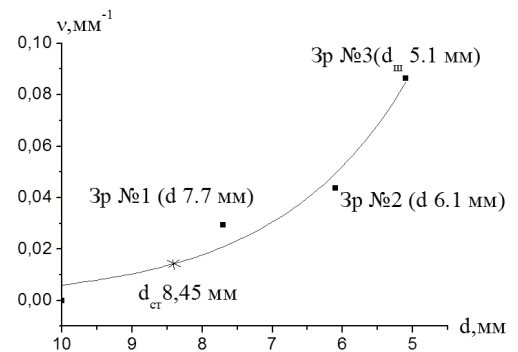


Рис. 5. Залежність кривизни меридіонального перерізу зразка від діаметра в зоні шийкоутворення

Відповідно, з урахуванням механізму утворення тріщини в шийці (8) і розрахунку v (7), формула (4) буде мати вигляд

$$\eta = 1 + 3 \ln \left(1 + \frac{d_{\text{кр}}}{4} v \right). \quad (9)$$

Граничну деформацію ε_p пропонується розраховувати за формулою

$$\varepsilon_p = 2 \ln \frac{d_0}{d_{\text{кр}}}, \quad (10)$$

чи після підстановки (8) в (10):

$$\varepsilon_p = 2 \ln \frac{d_0 \cdot 2,22}{(d_{\text{ш}} + d_{\text{ст}})}. \quad (11)$$

Для вивчення розподілу інтенсивності напружень і деформацій в перерізі зразків, zdeформованих до різних ступенів, їх розрізали по меридіональній площині вздовж осі і отримані поверхні заливали в спеціальній обоймі епоксидною смолою, потім їх шліфували та полірували до шорсткості $R_a < 0,16$ мкм (ГОСТ 2789–73) і вимірювали твердість за Віккерсом HV на приладі ТП–7Р–1 під навантаженням 50 Н з витримкою 12,5 с.

Після побудови графіків розподілу твердості будували ізолінії (ізоклери) рівних твердостей. Згідно з градувальним графіком (див. рис. 4) в кожній точці zdeформованої області визначали інтенсивність напружень і інтенсивність деформацій.

Для визначення компонент тензора напружень, без використання гіпотези Хаара–Кармана, зняті зразки повторно шліфували та полірували до шорсткості $R_a < 0,16$ мкм і піддавали травленню. Макрволокнисту структуру отримували травленням поверхні меридіональної площини zdeформованих зразків, 50 %-м водним розчином соляної кислоти за температури $t = 80$ °С протягом 45 хвилин [11].

За отриманими поздовжніми волокнами, використовуючи методику, запропоновану В. А. Огородніковим в роботі [12], відновили поперечні лінії «природної» діляльної сітки, попередньо збільшивши в 20 разів фотографії меридіонального перерізу з поздовжніми волокнами.

Експериментально-розрахунковий метод визначення напружено-деформованого стану в циліндричних зразках

Поле деформацій розраховували за допомогою прийомів, запропонованих І. П. Ренне [13] і В. А. Огородніковим. Параметри zdeформованої сітки заміряли на збільшеній в 20 разів фотографії меридіонального перерізу.

Ступінь деформації розраховували за О. А. Ільющиним

$$e_u = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_1 e_2}. \quad (12)$$

В процесі розробки експериментально-розрахункового методу визначення напружено-деформованого стану в циліндричних зразках, zdeформованих до різних ступенів деформації, використано роботи Г. Д. Деля та В. А. Огороднікова [14, 15].

Компоненти девіатора напружень (S_1, S_2, S_3) для сталевих зразків визначали за формулою

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\sigma_u}{e_u} e_{ij}. \quad (13)$$

Поточні значення інтенсивності напружень σ_u для заданого ступеня деформації e_u визначали за кривою течії $\sigma_u(e_u)$ для сталі Ст 3 (див. рис. 2).

Розраховували S_φ, S_r, S_z — компоненти девіатора напружень в циліндричній системі координат.

$$\begin{aligned} S_r &= S_1 \cos^2 \alpha + S_2 \sin^2 \alpha; \\ S_z &= S_1 \sin^2 \alpha + S_2 \cos^2 \alpha; \\ \tau_{rz} &= \frac{S_1 - S_2}{2} \sin 2\alpha, \end{aligned} \quad (14)$$

де α — показує головний напрямок деформації e_1 .

Методика розрахунку компонент тензора напружень така.

Гідростатичне напруження σ визначається інтегруванням диференціальних рівнянь рівноваги, які за осесиметричної деформації мають вигляд

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0. \quad (16)$$

При цьому також використовується інтегральне рівняння рівноваги

$$P = 2\pi \int_0^R \sigma_z r dr, \quad (17)$$

де R — радіус деформованого тіла; P — зусилля, яке визначається під час деформування досліджуваного тіла.

$$\sigma_r = (\sigma_r)_A + \int_r^R \left(\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} \right) dr, \quad (18)$$

де $(\sigma_r)_A = 0$ — радіальне напруження в точці А границі (рис. 6).

Осьове і колове напруження, відповідно, дорівнюють:

$$\sigma_z = S_z + \sigma_r - S_r; \quad (19)$$

$$\sigma_\phi = S_\phi + \sigma_r - S_r.$$

Показник напруженого стану, відповідно, дорівнює:

$$\eta = \frac{\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\phi}{\sigma_u}. \quad (20)$$

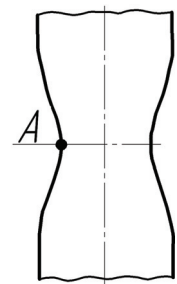


Рис. 6. Схема до розрахунку напружень

Висновки

1. Розроблено метод розрахунку напружено-деформованого стану в шийці зразка під час розтягу, що враховує об'ємність схеми напруженого стану. Метод є експериментально-розрахунковим і базується на методі виявлення волокнистої макроструктури і вимірюванні твердості деформованого металу.

2. Розроблено метод побудови діаграм пластичності, що враховує особливості локалізації деформації під час дослідження матеріалів на розтяг.

3. Експериментальним шляхом виявлено і підтверджено, що початок руйнування в шийці зразка під час розтягу відбувається в центрі ваги меридіонального перерізу, а повному відриву в зоні шийки передують поява макротріщини. Вищевказані обставини викликають необхідність оцінювання граничного ступеня деформації в процесі побудови діаграми пластичності дослідженням на розтяг не за формулою (2), а за запропонованою автором (11). Крім того, оцінювання показника напруженого стану варто проводити не за (4), а за (9), що враховує момент зародження макротріщини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. — М. : Машиностроение, 1975. — 400 с.
2. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. — М. : Наука, 1969. — 420 с.
3. Давиденков Н. Н. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца / Н. Н. Давиденков, Н. И. Спиридонова // Заводск. лабор. — 1945. — Т. 11, № 6. — С. 83—93.
4. Огородников В. А. Экспериментально-аналитическое исследование осесимметричной пластической деформации: дис. канд. тех. наук: 05.03.05 / В. А. Огородников. — Т., 1969. — 131 с.
5. Унксов Е. П. Инженерная теория пластичности / Е. П. Унксов. — М. : Машиностроение, 1959. — 328 с.
6. Бриджмен П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов / П. Бриджмен. — М. : Издательство иностранной литературы, 1955. — 444 с.
7. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. — Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1983. — 175 с.

8. Огородников В. А. Зависимость пластичности металлов от градиента пластических деформаций / В. А. Огородников, И. О. Сивак // Изв. АН СССР. Металлы. — 1978. — № 6. — С. 169—174.
9. Огородников В. А. Диаграммы пластичности и особенности их построения / В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, В. И. Музычук // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. — Краматорськ, 2006. — С. 251—255.
10. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. — М. : Машиностроение, 1971. — 200 с.
11. Металловедение и термическая обработка стали : справ. изд. в 3-х т. / Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта. — 4-е изд., перераб. и доп. — Т. 1. Методы испытаний и исследования. В 2-х кн. — Кн. 1. — М. : Metallurgia, 1991. — 304 с.
12. Огородников В. А. Исследование пластичности и разрушение материалов в процессах объемного формоизменения : дис. д-ра тех. наук : 05.03.05. / В. А. Огородников. — В., 1978. — 426 с.
13. Ренне И. П. Экспериментальные методы исследования пластического формоизменения в процессах обработки металлов давлением с помощью делительной сетки / И. П. Ренне. — Тула : ТПИ, 1970. — 146 с.
14. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. — К. : УМК ВО, 1989. — 152 с.
15. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. — М. : Машиностроение, 1978. — 174 с.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 11.02.2014

Кириця Інна Юрївна — канд. техн. наук, старший викладач кафедри опору матеріалів та прикладної механіки, e-mail: slk-vin@ukr.net.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

I. Yu. Kyrytsia¹

Features of calculation of parameters of the stress-stained state and construction of plasticity charts in the field of deformation of localization at stretching of cylindrical samples

¹Vinnitsia National Technical University

The stress – stained state at stretching of samples from materials forming the neck is investigated in this article. The method of construction of plasticity charts which considers features of localization of deformation at research of materials on stretching is offered.

Keywords: plasticity chart, limiting deformation, stress state index.

Kyrytsia Inna Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Strength of Material and Applied Mechanics, e-mail: slk-vin@ukr.net.

И. Ю. Кирица¹

Особенности расчета параметров напряженно-деформированного состояния и построения диаграмм пластичности в области локализации деформации при растяжении цилиндрических образцов

¹Вінницький національний технічний університет

В статье исследовано напряженно-деформированное состояние при растяжении образцов из материалов образующих шейку. Предложен метод построения диаграмм пластичности, который учитывает особенности локализации деформации при исследовании материалов на растяжение.

Ключевые слова: диаграмма пластичности, предельная деформация, показатель напряженного состояния.

Кириця Інна Юрївна — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, e-mail: slk-vin@ukr.net