

УДК 621.919

О. В. Грушко, к. т. н., доц.;
В. А. Огородніков, д. т. н., проф.;
М. І. Побережний;
М. П. Єленич

ПОБУДОВА КРИВОЇ ТЕЧІЇ МАТЕРІАЛУ ЗА ГРАНИЦЯМИ МІЦНОСТІ І ТЕКУЧОСТІ

Запропоновано метод побудови кривих течії на основі стандартних механічних характеристик матеріалу — границі міцності і текучості. Апроксимація кривих течії взята у вигляді степеневі функції за П. Людвигом. Показано особливості методу та його достатню точність. Спосіб побудови кривої може бути використаний при оцінюванні питомої енергії деформування під час експертиз дорожньо-транспортних пригод.

Вступ та постановка задачі

Під час розрахунків процесів деформування металів у холодному стані часто користуються кривими, що являють собою залежності істинних напружень від деформацій (інтенсивності напружень σ_i та інтенсивності логарифмічних деформацій e_i) $\sigma_i = f(e_i)$ [1—3]. Будують такі криві шляхом випробувань стандартних або спеціальних зразків матеріалу в умовах розтягу, стиску, зсуву чи інших експериментів. Зазвичай такі дослідження не складні, проте вимагають часу для підготовки зразків, їх випробування та обробки експериментальних даних. Інколи отримання зразків неможливе через відсутність досліджуваного металу (при обробці раніше проведених експериментів) або складність виготовлення заготовок (при проведенні спеціальних експертиз конструкцій). Додамо, що в довідниках з обробки металів тиском зазвичай наводяться характеристики кривої течії для стану відпалу [4, 5], а в певних випадках необхідно знати ці функції для термообробленого стану або стану постачання. Досить часто в таких випадках є відомими стандартні механічні характеристики матеріала, зокрема границі міцності і текучості.

Побудова і аналіз кривих течії описані у великій кількості робіт, огляд яких приведений, наприклад, у [2, 3]. Виділимо ближчу до актуальності нашої задачі апроксимацію С. Губкіна у вигляді

$$\sigma_i = \sigma_b \exp(e_{i\text{кр}}) (e_i/e_{i\text{кр}})^{e_{i\text{кр}}},$$

де σ_b — границя міцності матеріалу при розтягу; $e_{i\text{кр}}$ — логарифмічна деформація, що відповідає початку утворення шийки.

Проте, значення $e_{i\text{кр}}$ необхідно визначати шляхом дослідження на розтяг зразків. В довідниках ця величина, як правило, не наводиться.

На погляд авторів, достатню точність для більшості квазімонотонних процесів обробки металів тиском дає функція П. Людвіга [6, 7], яку використовують як в експериментально-теоретичних, так і числових розрахунках

$$\sigma_i = A e_i^n, \quad (1)$$

де A та n — емпіричні коефіцієнти — модуль та показник зміцнення.

Фізичний зміст цих величин такий: A відповідає напруженню при одиничній деформації, а n дорівнює логарифмічній деформації початку шийкоутворення при розтягу зразка.

Звичайно, на сьогодні день існують точніші апроксимації, однак, з урахуванням природного розкиду характеристик матеріалу та їх залежності від партії й особливостей термообробки, використання таких функцій може не дати особливих переваг. Вибір моделі залежить від особливостей поведінки матеріалу, бажання отримати найточніший розв'язок і можливість отримання кінцевих співвідношень, зумовлених математичними обмеженнями при проведенні перетворень у теоретичних і експериментально-теоретичних дослідженнях.

Таким чином, в основу подальших міркувань покладемо рівняння (1). Для розрахунку коефіцієнтів цієї залежності необхідно мати принаймні дві розрахункові точки, що належать шуканій кривій. Ці точки ми пов'яжемо з границею текучості і міцності. Основним питанням при цьому є визначення логарифмічних деформацій, що відповідають вказаним напруженням.

Метою роботи є розробка методу побудови кривої течії матеріалів за стандартними механічними характеристиками — границями текучості і міцності.

Основний розділ

Границя текучості σ_T , або умовна границя текучості $\sigma_{0,2}$ — напруження, що відповідає відносному залишковому видовженню $\varepsilon_T = 0,2\%$ (у низці випадків технічними умовами обумовлюються інші значення, наприклад $0,02\%$; $0,05\%$ та ін.). При таких малих деформаціях відносне залишкове видовження ε практично дорівнює інтенсивності логарифмічних деформацій e_i :

$$e_{i0,2} \approx \varepsilon_{0,2}/100 = 0,002,$$

де $e_i = \ln \frac{l + \Delta l}{l_0}$, $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 100(\%)$. Індекс 0,2 вказує на належність поточному стану матеріалу — текучості.

Істинне напруження, що відповідає границі текучості можна без суттєвої похибки припустити рівним $\sigma_{0,2}$,

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} \approx \frac{P_{0,2}}{F_{0,2}}; \quad \sigma_{i0,2} \approx \sigma_{0,2},$$

де F_0 , $F_{0,2}$ — початкова площа поперечного перерізу зразка та площа що відповідає $\sigma_{0,2}$; $P_{0,2}$ — сила, що відповідає $\sigma_{0,2}$.

Отже, згідно з (1)

$$\sigma_{0,2} = A \cdot 0,002^n. \tag{2}$$

Істинне напруження, що відповідає границі міцності σ_B , позначимо σ_{iB}

$$\sigma_{iB} = \frac{P_{\max}}{F_{кр}}; \quad \sigma_B = \frac{P_{\max}}{F_0},$$

де P_{\max} , $F_{кр}$ — сила та площа зразка, що відповідає початку утворення шийки.

З урахуванням апроксимації (1) $F_{кр} = F_0 \exp(-e_i)$.

У роботах [1, 8], на основі аналізу стійкості деформування циліндричного зразка показано, що якщо модель матеріалу відповідає апроксимації (1), то утворення шийки починається при деформаціях $e_{iкр} = n$ (зазначимо, що моделювання процесу розтягання методом скінчених елементів [6] дає ті ж результати критичної деформації з похибкою менше 2%), тоді

$$\sigma_{iB} = \frac{P_{\max}}{F_{кр}} = \frac{P_{\max}}{F_0 \exp(-e_i)} = \sigma_B \exp(n); \quad \sigma_{iB} = A e_{iкр}^n = A n^n;$$

$$\sigma_B \exp(n) = A n^n, \text{ звідки}$$

$$\sigma_B = A \exp(-n) n^n. \tag{3}$$

Таким чином, маємо систему нелінійних рівнянь (2), (3):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0,2} &= A \cdot 0,002^n; \\ \sigma_B &= A \cdot \exp(-n) n^n \end{aligned} \right\} \text{ або } \left. \begin{aligned} \sigma_{e_T} &= A \cdot e_T^n; \\ \sigma_B &= A \cdot \exp(-n) n^n, \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

де e_T — допуск на пластичну деформацію.

Показник зміцнення n з цієї системи може бути знайдений шляхом числового розв'язку рівняння, розв'язок якого в загальному вигляді поки не знайдений,

$$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_B} - \exp(n) \left(\frac{0,002}{n} \right)^n = 0 \quad \text{або} \quad \frac{\sigma_{e_T}}{\sigma_B} - \exp(n) \left(\frac{e_T}{n} \right)^n = 0. \quad (5)$$

Далі підстановкою n в одне з рівнянь (4) знаходять A .

Перевірку цього методу побудови кривої течії виконаємо крім візуальної відповідності графіків (рис. 1) шляхом порівняння роботи пластичної деформації. Виправданість використання саме такої перевірки пов'язана з низкою задач, для яких може застосовуватися цей спосіб побудови кривої — наприклад, при експертизах дорожньо-транспортних пригод [9].

Питома робота W до $e_i = e_{ікр}$ може бути розрахована зі залежності [9]

$$W = \int_0^{e_i} \sigma_i de_i = \int_0^{e_{ікр}} A e_i^n de_i = \frac{A e_{ікр}^{n+1}}{n+1} = \frac{A n^{n+1}}{n+1}. \quad (6)$$

Похибка розрахунку роботи

$$\Delta_W = \frac{W_P - W_{\text{э}}}{W_{\text{э}}} 100\%. \quad (7)$$

Результати перевірки запропонованої методики на основі наявних кривих течії і стандартних дослідів наведені в таблиці.

Перевірка точності методу

№ п/п	Матеріал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	Розрахунок		Експеримент		Δ_W , %	Примітки
				A , МПа	n	A , МПа	n		
1	Сталь 45	365	700	1150	0,185	1100	0,155	3	Відпалена. Графік на рис. 1
2	Сталь 30 лист	310	420	589	0,103	680	0,18	10,2	Відпалена, якщо $e_T = 0,012 - \Delta_W = 0,1\%$
3	Сталь 20	255	430	671	0,156	730	0,205	5,1	Відпалена, якщо $e_T = 0,005 - \Delta_W = 0,1\%$
4	Сталь 3	276	406	595	0,124	840	0,25	2,6	Відпалена
5	Сталь 20Х	280	480	755	0,16	930	0,215	5,9	Відпалена
6	30Х3МФА	1050	1225	1553	0,063	1540	0,058	1	Поліпшена
7	30Х3МФА	400	708	1128	0,167	1163	0,186	2	
8	38Х2МЮА	800	981	1291	0,077	1396	0,104	1,6	Поліпшена
9	38Х2МЮА	585	711	1149	0,109	1134	0,096	2,6	
10	ЛС59-1	140	350	628	0,24	890	0,43	6,2	
11	Титан ВТ6	950	1100	1386	0,061	1350	0,061	2,7	Відпалена

Необхідність числового розв'язку рівняння (5) дещо знижує зручність використання запропонованої методики, тому складемо номограму визначення показника зміцнення n (рис. 2). На рисунку наведені декілька графіків, що відповідають різним значенням відносного залишкового видовження ϵ_r . Користуючись цією номограмою, треба звертати увагу на технічні умови, що відповідають визначенню границі текучості. За відсутності таких умов слід використовувати лінію $e_T = 0,002$, за наявності ділянки текучості матеріалу (маловуглецеві сталі) — більші значення $e_T = 0,01...0,02$. Таким чином, точка $(e_{i0,2}, \sigma_{0,2})$ досить надійною буде для матеріалів, які не дають виражену площадку текучості на діаграмі розтягу.

Відмітимо такі особливості розрахунків кривої течії:

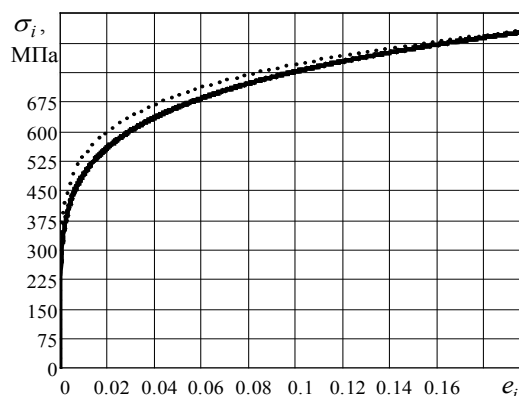


Рис. 1. Криві течії сталі 45: розрахункова (суцільна) і експериментальна (пунктирна)

— границі текучості і міцності є середньостатистичними величинами, і чим більший їхній розкид, тим буде менша точність побудови кривої течії;

— поведження матеріалів може приблизно відповідати функції (1), тоді деформація $e_{iкр} = n$, що відповідає границі міцності, буде неточною, і це відіб'ється на результатах розрахунку;

— використання побудованих кривих течії буде більш коректним при деформаціях $e_i \leq n$ та незначно перевищуючих n .

Висновки

1. Крива течії однозначно відповідає границі міцності та текучості при відомому вигляді функції моделі зміцнення матеріалу. До уваги береться лише ізотропне зміцнення початково ізотропного матеріалу. Для більшості випадків достатньо використовувати степеневу апроксимацію П. Людвіга (1).

2. Побудова кривої течії за запропонованим методом має значення у разі неможливості їхньої побудови іншими, точнішими методами. Криві є скоріше оцінковими, ніж технологічно-розрахунковими.

3. Якщо крива течії побудована, наприклад, за результатами стиску (або зсуву) зразків, то внаслідок гіпотези про єдину криву течії з використанням залежностей (4) можна приблизно оцінити характеристики міцності матеріалу при розтягу.

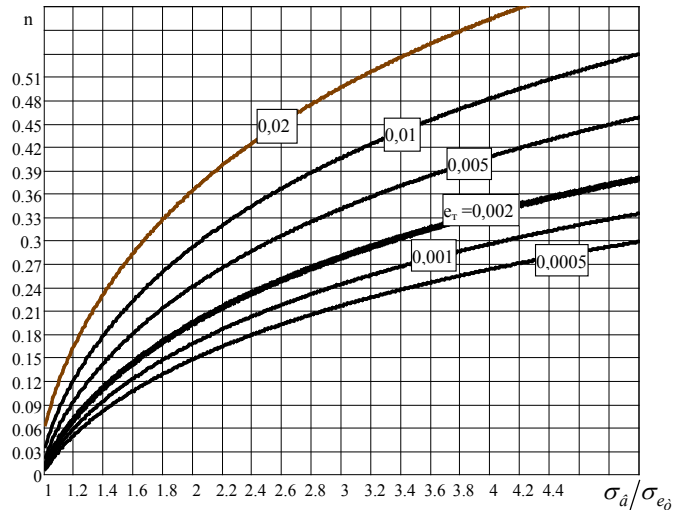


Рис. 2. Номограма визначення показника зміцнення n :
 ϵ_t — допуск на пластичну деформацію в умовній границі текучості

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести : учебник для студентов вузов / Н. Н. Малинин. — [2-е изд., перераб. и доп.]. — М. : Машиностроение, 1975. — 400 с. : ил.
2. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. — К. : УМК ВО, 1989. — 152 с.
3. Хван Д. В. Технологические испытания материалов. — Воронеж : изд-во Воронежского университета, 1992. — 152 с. — ISBN 5-7455-0671-7.
4. Третьяков А. В., К. Механические свойства сталей при пластическом деформировании : справочник / Третьяков А. В., Трофимов Г. К., Гурьянов М. — М. : Машиностроение, 1971. — 268 с.
5. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. — М : Машиностроение, 1980. — 155 с.
6. Грушко А. В. Особенности напряженно-деформированное состояния в шейке цилиндрического образца / [А. В. Грушко, В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, Н. П. Еленич] // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов. — 2009. — №1(20) — С. 25—29. — ISBN 878-966-379-325-2.
7. Грушко А. В. Построение кривых течения материалов с учетом шейкообразования / А. В. Грушко, В. А. Огородников, В. И. Музычук // Кузнечно-штамповочное производство «Обработка металлов давлением». — 2007. — № 8. — С. 16—20. — ISSN 0234-8241.
8. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. — М. : Машиностроение, 1978. — 174 с.
9. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. — Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. — 204 с. — ISBN 966-641-117-2.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів та прикладної механіки

Надійшла до редакції 4.06.09
Рекомендована до друку 15.06.09

Грушко Олександр Володимирович — доцент, **Огородніков Віталій Антонович** — завідувач кафедри, **Побережний Михайло Іванович** — асистент.

Кафедра опору матеріалів та прикладної механіки Вінницького національного технічного університету;

Еленич Микола Павлович — старший викладач кафедри «Трактори автомобілі та технічний сервіс»

Вінницький національний аграрний університет