

ІДЕНТИФІКАЦІЯ КРИВОЇ ЗМІЦНЕННЯ МАТЕРІАЛУ ЗА ТВЕРДІСТЮ І МІЦНІСТЮ

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано методи побудови кривих зміцнення на основі стандартних механічних характеристик матеріалу — твердості Брінелля у поєднанні з даними границь міцності і текучості при розтягуванні. Апроксимація кривих зміцнення прийнята у вигляді степеневої функції за П. Людвігом. Побудовані номограми, показана особливість методів і їх точність на прикладі 8 різних матеріалів.

Ключові слова: крива зміцнення, твердість за Брінеллем, границя міцності, границя текучості, степенева функція.

Вступ

Експериментальне отримання кривих зміцнення (КЗ) не завжди здійсненне через можливу відсутність потрібного металу, необхідного устаткування або складності виготовлення зразків. Такі задачі можуть виникати під час: моделювання процесів обробки металів тиском (ОМТ); проведенні спеціальних експертиз деталей, конструкцій, що навантажуються за границями пружності; необхідності обробки даних експериментальних досліджень, опублікованих в літературних джерелах; необхідності оцінювання відповідності КЗ і його характеристик міцності тощо. Також дані літературних джерел про КЗ [1—5] далеко не повністю відображають використовувані для холодної ОМТ метали і сплави, зокрема з урахуванням їх термообробки. Втім, для більшості металів, зазвичай, відомі стандартні механічні характеристики — твердість, границі міцності і текучості при розтягуванні [6].

Слід зазначити, що КЗ навіть для того самого матеріалу можуть істотно відрізнятися. Так, на рис. 1 показані криві зміцнення сталі 20Х в стані відпалу, взяті з джерел [1, 7], а також отримані дослідним шляхом в умовах стиску коротких зразків для двох різних партій постачання після відпалу. Як видно, всі криві значно відрізняються одна від одної. В результаті, наприклад, розрахункові сили одноосевого стискування заготовок до ступеня деформації 0,6 для металів, КЗ яких показані на рис. 1 (графіки 1 і 4), відрізнятимуться приблизно на 30%. Отже, важливо мати надійний і простий спосіб ідентифікації КЗ, який виключатиме трудомісткі дослідження.

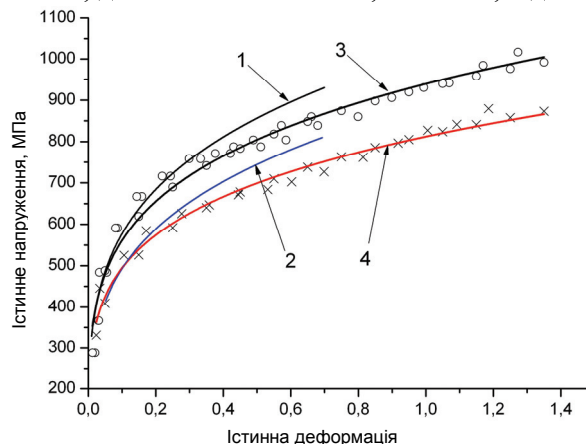


Рис. 1. Криві зміцнення сталі 20Х (термообробка — відпал):
1 — крива, отримана на основі даних [7] ($A = 1015$ МПа, $n = 0,25$);
2 — крива, отримана на основі даних [1] ($A = 890$ МПа, $n = 0,26$);
3 — перша партія ($A = 939 \pm 8$ МПа, $n = 0,22 \pm 0,01$; $HB = 1460$ МПа);
4 — друга партія ($A = 813 \pm 5$ МПа, $n = 0,22 \pm 0,01$; $HB = 1300$ МПа)

Аналіз останніх досліджень і літератури

П. Людвіг [8] вперше запропонував використання степеневих функцій зміцнення. Простий варіант функції часто називають першим рівнянням П. Людвіга

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

де σ_i — дійсна напруга; e_i — дійсна деформація; A і n — показник і модуль деформаційного зміцнення.

Перевагою апроксимації (1) є: легкість інтегрування функції; ясність фізичного сенсу її коефі-

цієнтів (n дорівнює логарифмічній деформації початково-ізотропного матеріалу, що відповідає границі міцності в дослідах на розтягування, A — дійсне напруження при одиничній деформації); наявність всього двох невідомих коефіцієнтів; достатня точність в області розвинених пластичних деформацій (0,1...1), я якій кореляція для широкого кола металів сягає 90...97 %.

А. Д. Матвеев пропонує розраховувати параметри кривої зміцнення, представлені у вигляді трипараметричної степеневі залежності Г. Свіфта, використовуючи значення границь міцності і текучості [4]. С. І. Губкін [9] використовував формули розрахунку коефіцієнтів в апроксимації (1) на основі відносного звуження зразка після розриву і дійсного напруження в найменшому перерізі шийки σ_{sh} . Для використання цих підходів необхідно знати параметри e_0 або σ_{sh} , що знижує їх практичну цінність. Розрахунок e_0 і σ_{sh} вимагає проведення додаткових експериментів.

У роботах автора досліджені залежності параметрів кривої зміцнення від початкової твердості [10, 11] та від границь міцності і текучості [12, 13].

Для розрахунку параметрів залежності (1) слід використовувати як мінімум 2 незалежних умови. Так, в роботі [13] використано зв'язок апроксимації (1) зі значеннями границь міцності і текучості, яка відповідає виразам

$$\sigma_i = A \cdot \exp(-n) \cdot n^n; \quad (2)$$

$$\sigma_{0,2} = A \cdot 0,002^n, \quad (3)$$

де 0,002 — допуск на пластичну деформацію.

За відомого допуску на пластичну деформацію, зокрема за наявності площадки текучості на діаграмі розтягу, замість 0,002 в (3) слід використовувати значення e_m (e_m — відносна залишкова пластична деформація, що відповідає крайній точці ділянки текучості на діаграмі розтягу).

Розв'язання систем рівнянь (2), (3) дає результати з великим довірчим інтервалом, що обмежує використання методу [12].

У роботі [10], за допомогою методу скінченних елементів отримано емпіричний зв'язок кривої зміцнення у вигляді (1) з твердістю за Брінеллем HB (втиснення сталеві кульки діаметром 0,01 м з силою 29,43 кН):

$$HB = -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798}. \quad (4)$$

Відхилення значень HB за (4) і отриманих в результаті моделювання МСЕ складає не більше 3,5 % з ймовірністю 99,9 %, і не більше 1 % з ймовірністю 95 %. Межі зміни аргументів у виразі (4) $0,05 \leq n \leq 0,5$; $500 \leq A \leq 1500$ МПа. Відмічений слабкий вплив модуля Юнга і коефіцієнта Пуассона на величину HB .

Додатковою умовою до рівняння (4) в роботі [11] пропонується використання залежності границі міцності від твердості у вигляді

$$\sigma_i = a + b \cdot HB, \quad (5)$$

де a і b — емпіричні коефіцієнти, залежні від виду матеріалу.

Недоліком методу, що використовує формули (4) і (5) є необхідність завдання коефіцієнтів a і b , які суттєво залежать від стану постачання і термообробки металу.

Таким чином, актуальним є розвинення відмічених методів для виявлення коректнішого і точнішого зв'язку стандартних характеристик і кривої зміцнення металів в холодному стані.

Метою досліджень є розробка і перевірка методів визначення коефіцієнтів апроксимації A і n кривої деформаційного зміцнення металу в холодному стані залежно від твердості за Брінеллем HB у поєднанні з даними границь міцності та текучості.

Матеріали і результати досліджень

За основу розроблюваного методу беремо зв'язок КЗ з твердістю у вигляді (4). Як додаткові умови — залежності (2) і (3). Таким чином маємо системи рівнянь:

— систему, що пов'язує функціонально границю міцності (2), твердість (4) і вираз (1)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= A \cdot \exp(-n) \cdot n^n; \\ HB &= -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

— систему, що пов'язує залежності границь текучості (3) з (4) і (1)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0,2} &= A \cdot 0,002^n; \\ HB &= -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

За одночасно відомих границях міцності, текучості і твердості система стає надлишковою

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{0,2} &= A \cdot 0,002^n; \\ \sigma_i &= A \cdot \exp(-n) \cdot n^n; \\ HB &= -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Її розв'язок може бути знайдений методом найменших квадратів. В цьому випадку слід враховувати, що точність виразу, який пов'язує параметри кривої зміцнення і твердість за (4), серед виразів, що входять в (8), є найвищою. Гіпотетично точність виразу (2) дещо вища (3), що робить переважним використання σ_i і HB . Останнє відноситься до металів з вираженою ділянкою текучості на діаграмі розтягу.

У припущенні однакової точності виразів (2) і (3) показник зміцнення n може бути знайдений як середнє арифметичне за двома розв'язками (6) і (7).

Розв'язання систем рівнянь (6) і (8) показано у вигляді номограм (рис. 2, 3).

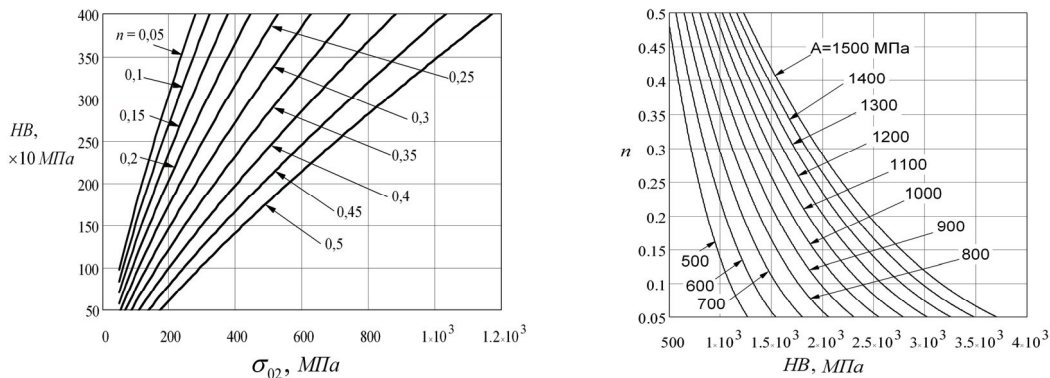


Рис. 2. Номограми визначення коефіцієнтів n і A

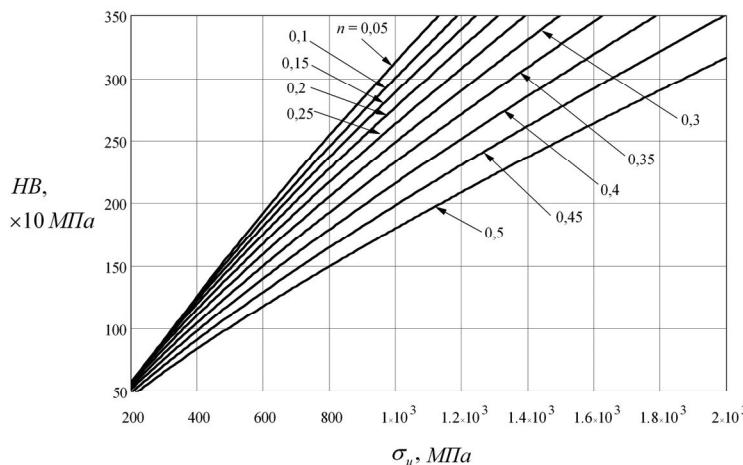


Рис. 3. Номограма визначення показника n за HB

Для прикладу, на рис. 4 показані криві зміцнення сталі 38Х2МЮА, побудовані за різними методами. Еталонну криву (1) отримали в дослідях на стиск коротких зразків. Кореляція кривої 1 з експериментальними точками сягає 97 %. Як видно з рисунка, спостерігається несуттєва розбіж-

ність розрахункових графіків 2 (за HB , σ_i) і 3 (за HB , $\sigma_{0,2}$), а також кривої 4, побудованої на основі середньоарифметичних значень A і n від дослідних точок.

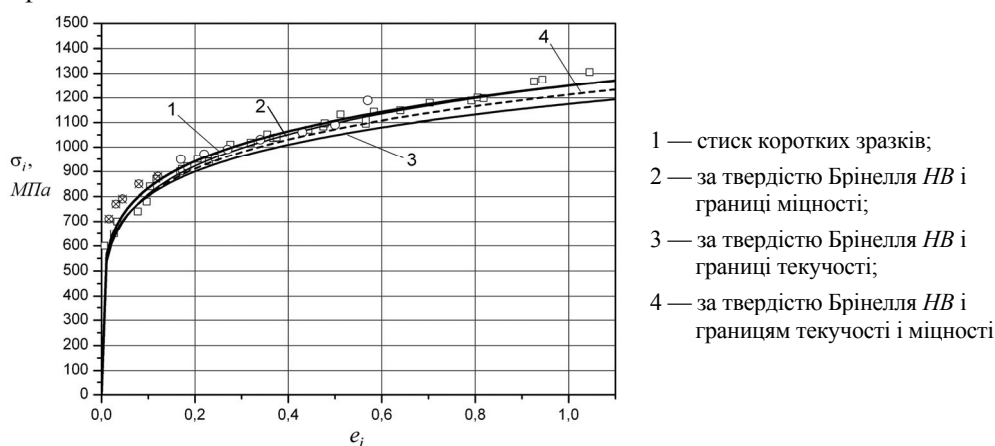


Рис. 4. Криві зміцнення сталі 38X2МЮА

Також досліджені криві зміцнення низки металів і сплавів, результати яких відображені в таблиці. Особливості розташування і точність кривих різних матеріалів відповідають рис. 4.

Перевірка визначення A і n по $\sigma_{0,2}$, σ_i і HB

Матеріал, термообробка	Експеримент					Розрахунок A , МПа і n за формулами					
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_i , МПа	HB , МПа	A , МПа	n	(6)		(7)		(8)	
						A	n	A	n	A	n
Сталь 45, нормалізація	390	700	2100	1100	0,155	1077	0,148	1155	0,175	1116	0,162
Сталь 20, відпал	220	440	1300	730	0,205	757	0,213	719	0,191	738	0,202
Сталь 20Х, відпал	230	510	1460	939	0,22	915	0,241	850	0,21	883	0,226
Сталь 30Х3МФА, поліпшення	1050	1225	3680	1525	0,069	1600	0,074	1507	0,058	1554	0,066
Сталь 30Х3МФА	390	700	1930	1082	0,227	1270	0,249	987	0,149	1129	0,199
Сталь 38Х2МЮА, поліпшення	760	1080	3170	1488	0,121	1571	0,12	1541	0,114	1556	0,117
Сталь 38Х2МЮА	420	755	2180	1255	0,176	1250	0,189	1175	0,166	1213	0,178
Титан ВТ6, відпал	950	1100	3350	1350	0,061	1425	0,071	1349	0,056	1387	0,064

Висновки

Використання запропонованих методів визначення коефіцієнтів апроксимації за П. Людвігом є достатньо зручним, унаслідок використання найзагальніших стандартних характеристик міцності металів і сплавів. Криві зміцнення, розраховані за цими методами є наближеними, тому їх слід застосовувати у випадках:

а) за необхідності отримати криву зміцнення для аналізу вже проведених раніше експериментальних досліджень процесів ХПД, в яких величини HB , $\sigma_{0,2}$ і σ_i оброблюваного металу отримані дослідним шляхом і коли інші властивості металу в пластичній області невідомі;

б) з метою отримання кривої зміцнення металу (сплаву), за її відсутності в літературних джерелах (але коли відомі HB , $\sigma_{0,2}$ і σ_i), а також у разі неможливості проведення безпосереднього випробування зразків на стискування, розтягування, твердість та ін.;

в) для розбраковування партії металу однієї марки за групами з прогнозованими параметрами кривої зміцнення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации / В. А. Кроха. — М. : Машиностроение, 1980. — 155 с.
2. Третьяков А. В. Механические свойства сталей при пластическом деформировании : справ. / А. В. Третьяков, Г. К. Трофимов, М. К. Гурьянов. — М. : Машиностроение, 1971. — 268 с.
3. Полухин П. И. Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов : справ. / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. — М. : Металлургия, 1983. — 352 с.

4. Ковка и штамповка : справ. : в 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / под ред. Е. И. Семенова. — М. : Машиностроение, 1985. — 568 с.
5. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением : справ. / А. Хензель, Т. Шпиттель. — М. : Metallurgia, 1982. — 360 с.
6. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. — 2-е изд., доп. и испр. — М. : Машиностроение, 2003. — 784 с.
7. Сопротивление деформации и пластичность при обработке металлов давлением / Ю. Г. Калпин [и др.]. — М. : Машиностроение, 2011. — 244 с.; 73 ил.
8. Людвиг П. Основы технологической механики // Расчеты на прочность. — М. : Машиностроение, 1970. — Вып. 15. — С. 130—166.
9. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов : в 3 т. — Т. 1. Физико-механические основы пластической деформации / С. И. Губкин. — М. : Metallurgizdat, 1960. — 376 с.
10. Грушко А. В. Развитие использования метода твердости по Бринеллю для определения напряжения текучести при холодной деформации / А. В. Грушко // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2013. — № 1. — С. 36—39. — ISSN 0543-5749.
11. Грушко А. В. Определение параметров кривой течения материала по его твердости / А. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов. — Краматорск : ДГМА, 2010. — № 2 (23). — С. 83—87. — ISSN 2076—2115.
12. Грушко А. В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія : Машинобудування. — К. : НТУУ «КПІ», 2010. — № 60. — С. 133—137. — ISSN 2305-9001.
13. Побудова кривої течії матеріалу за границями міцності і текучості / [О. В. Грушко, В. А. Огородніков, М. І. Побережний, М. П. Єленич] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2009. — № 6 (87). — С. 90—93. — ISSN 1997—9266.

Рекомендована кафедрою опору матеріалів і прикладної механіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 10.09.2014.

Грушко Олександр Володимирович — д-р техн. наук., доцент, професор кафедри опору матеріалів і прикладної механіки, e-mail: grushko@svitonline.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. V. Hrushko¹

Identification of the curve of work-hardening of material on hardness and durability

¹Vinnitsia National Technical University

The paper offers methods of construction of hardening curve on the basis of standard mechanical descriptions of material by Brinell hardness method in combination with data of tensile and fluidity strengths at tension. Approximation of hardening curve is accepted as a power law of P. Ludwig. Nomographs are set up, the feature of methods and their exactness are demonstrated on the example with 8 different materials.

Keywords: hardening curve, Brinell hardness, tensile strength, yield stress, power law.

Hrushko Oleksander V. — Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Professor of the Chair of Resistance of Materials and Applied Mechanics, e-mail: grushko@svitonline.com

A. V. Grushko¹

Идентификация кривой упрочнения материала по твердости и прочности

¹Вінницький національний технічний університет

Предложены методы построения кривых упрочнения на основе стандартных механических характеристик материала — твердости Бринелля в сочетании с данными пределов прочности и текучести при растяжении. Аппроксимация кривых упрочнения принята в виде степенной функции по П. Людвигу. Построены номограммы, показана особенность методов и их точность на примере 8 различных материалов.

Ключевые слова: кривая упрочнения, твердость по Бринеллю, предел прочности, предел текучести, степенная функция.

Грушко Александр Владимирович — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, e-mail: grushko@svitonline.com