

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ КРИВОЇ ЗМІЦНЕННЯ ЗА ВИМІРЮВАННЯМ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛУ

В роботі розроблено експериментально-розрахунковий метод визначення динамічної кривої зміцнення металічних матеріалів шляхом вимірювання його статичної твердості за Брінеллем і динамічною за Лібом. Динамічна крива зміцнення апроксимована трипараметричною степеневою функцією, в якій динамічна складова враховується показником швидкісного зміцнення. Метод перевірено на 5 різних матеріалах – вуглецевих та легированих сталях.

Ключові слова: крива зміцнення, твердість за Брінеллем, твердість за Лібом, степенева функція.

O.V. HRUSHKO

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

### DETERMINATION OF DYNAMIC STRENGTHENING CURVE BY THE METAL HARDNESS MEASUREMENTS

*Abstract – The purpose of the research is justify and develop a method for determining the parameter of speed strengthening of metallic material by measuring its static Brinell hardness and dynamic Leeb hardness.*

*The method is based on the models obtained by finite elements and regression analysis. Dynamic strengthening curve is approximated with the three-parameter power function, which takes into account the dynamic component as indicator of the speed strengthening.*

*Experimental verification is made for the following steels: ШХ15, X18H9T, 20X, Steel 20, Steel 45. Measurement of Leeb hardness is executed using portable hardness testers. Dynamic strengthening curve is constructed using a unique dynamic stand that provides different loading rates.*

*The method of speed strengthening hardness indicator determination is experimental and calculated. It has satisfying sensitivity to the value of the dynamic Leeb hardness and can be used in case of impossibility to carry out the direct dynamic metal test.*

*Keywords: strengthening curve, Brinell hardness, Leeb hardness, power function.*

### Вступ

Динамічна дія на метал заготовки, що оброблюється методами холодної пластичної деформації (ХПД), може робити суттєвий вплив на його властивості щодо опору пластичному формозмінюванню. Як правило, це виражається в підвищенні границь текучості, міцності, зміцнюваності металу при середніх і високих швидкостях деформації, що слід враховувати при розрахунку і моделюванні таких процесів обробки тиском, як електрогідроімпульсне штампування, прокатка, методи поверхневої пластичної деформації – обкочування, вигладжування, обдування дробом та ін. Швидкісні ефекти враховуються також при кінцевоелементному моделюванні аварій автомобілів, літаків, механізмів, будівельних конструкцій тощо [1, 2]. У літературі достатньо слабо представлено вплив швидкості деформації на зміцнення в холодному стані більшості конструкційних матеріалів [2–4]. В результаті виникає необхідність експериментальної або розрахункової оцінки цих параметрів [4–6]. Для таких досліджень застосовують спеціальні лабораторні динамічні випробування, які є малопоширеними і дорогавартісними. Таким чином, актуальною є розробка методу визначення параметрів швидкісного зміцнення матеріалу, що дозволяє застосовувати стандартні методи випробувань.

### Аналіз досліджень, постановка цілі

У основи опису динамічних кривих зміцнень можуть бути покладені різні гіпотези, що знаходять своє відображення у відповідних моделях металу. Надалі розглядається ізотропне зміцнення початково-ізотропного матеріалу в холодному стані.

Динамічні криві зміцнення часто ставлять у відповідність із статичними, з врахуванням масштабного коефіцієнта, який залежить від властивостей металу і швидкості деформації [3, 6]

$$\sigma_i = \sigma_{ist}(e_i) f(\dot{e}_i), \quad (1)$$

де  $\sigma_i$ ,  $e_i$  – інтенсивність напруження і деформацій (дійсне напруження і деформація);  $\sigma_{ist}(e_i)$  – функція напруження течії в квазістатичних умовах;  $\dot{e}_i$  – інтенсивність швидкостей деформацій.

Іншим підходом може бути апроксимація динамічних кривих зміцнень відповідними рівняннями, наприклад [4]

$$\sigma_i = A_V e_i^{n_V}, \quad (2)$$

де  $A_V$ ,  $n_V$  – коефіцієнти, що враховують вплив швидкості деформацій на напруження течії.

Параметри  $A_V$ ,  $n_V$  знайдені за результатами випробувань різних металів і нелінійно залежать від швидкості деформацій [4]:

$$A_V = A \left[ 1,045 + \frac{1}{135} \ln(0,00227 + \dot{e}_i) \right],$$

$$n_V = n \left[ \exp[-0,127 \ln(1 + \dot{e}_i)] \right].$$

Недоліком моделі (2) є однакова динамічна зміцнюваність при ідентичних статичних кривих зміцнення, що не узгоджується з експериментом для металів, які відносяться до різних реологічних класів.

При швидкостях деформацій більше  $10 \text{ с}^{-1}$ , з урахуванням констант параметрів зміцнення матеріалу, що зустрічаються на практиці, використовуваних в обробці металів тиском (ОМТ), модель (1) знайшла застосування у вигляді степеневі функції [3, 6, 8]

$$\sigma_i = A(e_0 + e_i)^n \dot{e}_i^m.$$

де  $A$ ,  $n$ ,  $m$  – константи матеріалу – модуль зміцнення, показник деформаційного зміцнення і показник швидкісного зміцнення відповідно;  $e_0$  – деформація початкової текучості.

З метою зменшення кількості констант моделі параметр  $e_0$  може бути заданий за перетином прямолінійної пружної ділянки, що визначається модулем Юнга із степеневою функцією  $\sigma_i = A e_i^n$  [7]. Таке наближення виправдане в задачах, в яких пластична деформація  $e_i$  досягає значень, що значно перевершують величину  $e_0$ .

Таким чином, в даній роботі прийнята модель зміцнення матеріалу у вигляді

$$\sigma_i = A \left[ \left( \frac{E}{A} \right)^{\frac{1}{n-1}} + e_i \right]^n \dot{e}_i^m. \quad (3)$$

За основу дослідження властивостей металу приймемо випробування на твердість в умовах квазістатичного і динамічного навантаження. Відзначимо, що з твердістю зв'язують різні механічні властивості металу – межі текучості, міцності; коефіцієнти Хола-Петча; мікроструктуру металу і ін. [8, 9]. Очевидна феноменологія зв'язку процесу впровадження кульового індентора в статичній і динамічній постановці задачі з кривою зміцнення. У роботах [10–12] обґрунтовані методи вивчення кривих зміцнення, що використовують прості методи випробувань, зокрема на основі стандартних механічних характеристик. Найбільш високу точність мають методи, що ґрунтуються на вимірюванні твердості з різними навантаженнями на індентор [10].

Метою даної роботи є обґрунтування і розробка методу визначення параметра  $m$  швидкісного зміцнення металічного матеріалу шляхом вимірювання його статичної твердості за Брінеллем  $HB$  і динамічною за Лібом  $HL$ , як найбільш простих і таких, що легко реалізуються в лабораторних і виробничих умовах.

### Дослідження

#### Визначення статичної кривої зміцнення

Зв'язок статичної твердості (при  $m=0$ ) при впровадженні кулі діаметром 0,010 м при навантаженнях 29,43 кН (3000 кгс) і 2,453 кН (250 кгс) з кривою зміцнення матеріалу отримано з використанням методу скінчених елементів (МСЕ) за таких умов: характеристики матеріалу: коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,3$ , модуль Юнга  $E = 210$  ГПа, коефіцієнт тертя між кулькою і поверхнею по Кулону  $f = 0,1$ . Матеріал кульки – абсолютно пружний з  $\mu = 0,3$  і  $E = 210$  ГПа. В результаті отримані степеневі залежності

$$HB_{3000} = -810,4 + 965,8n^{0,349} + 19,05A^{0,798} - 19,51n^{0,349}A^{0,798}, \quad (4)$$

$$HB_{250} = -762,43 + 778,1n^{0,396} + 54,97A^{0,624} - 59,72n^{0,396}A^{0,624}, \quad (5)$$

де  $HB_{3000}$ ,  $HB_{250}$ ,  $A$  вимірюються в МПа.

Похибки визначення  $HB_{3000}$  по (4) не більше 2%,  $HB_{250}$  по (5) не більше 4%. Межі зміни аргументів –  $0,05 \leq n \leq 0,5$ ;  $500 \leq A \leq 1500$  МПа.

Розв'язання систем рівнянь (4), (5) дає значення апроксимуючих коефіцієнтів з похибкою не більше 10%. Відмінність в кореляціях кривих зміцнення, побудованих за твердістю з кривими зміцнення, що отримані випробуванням зразків на стискування, розтягування і кручення складає менше 2%.

#### Визначення динамічної кривої зміцнення по вимірюванню твердості $HL$ за Лібом

Метод твердості за Лібом ґрунтується на вимірюванні швидкості відскоку  $v_V$  ударника зі сферичним наконечником діаметром 3 мм, масою 5,5 грама, з початковою швидкістю  $v_0 = 2$  м/с (енергія удару 11 мДж). Твердість визначається згідно з залежністю

$$HL = 1000 \frac{v_V}{v_0}. \quad (6)$$

Слідуючи апробованій методиці, моделювали процес вимірювання твердості за Лібом МСЕ (LS-

DYNA). Відзначимо, що така задача відноситься до класу динамічної, пружно-пластичної, контактної, нелінійної, такої, що вимагає обрахунку великих переміщень і деформацій. Властивості матеріалу задавали у вигляді кривої зміцнення з урахуванням швидкісного зміцнення, згідно з залежністю (3). Характеристики пружності матеріалу і умови контакту приймали такими ж, як і при моделюванні твердості за Брінеллем. Задавалися різними  $n = 0,05 \dots 0,55$  з інтервалом  $0,1$  і  $A = 500 \dots 1500$  МПа з інтервалом  $250$  МПа,  $m = 0 \dots 0,1$  з інтервалом  $0,01$ . Таким чином, отримали приблизно  $300$  значень динамічної твердості  $HL$ . Відзначимо, що швидкість деформації в осередку формозмінювання досягала значень  $500\text{--}1500$  с<sup>-1</sup>. Для кожної пари  $A$  і  $n$  проводили розрахунок  $HB_{250}$  і  $HB_{3000}$ . Таким чином, набору величин  $A$ ,  $n$  і  $m$  поставлені у відповідність значення  $HL$ ,  $HB_{250}$  і  $HB_{3000}$ .

Для кожного значення  $m$  шукали кореляційний зв'язок  $HL(HB_{3000}, HB_{250})$  у вигляді полінома 2-го ступеня (кореляція близько 98,5%)

$$HL = a_0 + a_1 \cdot HB_{3000} + a_2 \cdot HB_{250} + a_3 \cdot HB_{3000}^2 + a_4 \cdot HB_{250}^2 + a_5 \cdot HB_{3000} \cdot HB_{250}, \quad (7)$$

де  $a_0, a_1 \dots a_5$  – коефіцієнти, залежні від показника зміцнення  $m$ .

Подальше вивчення показало, що коефіцієнти виразу (7) слідує квадратичним залежностям відносно  $m$  (кореляція близько 99%):

$$a_i = b_{i1}m^2 + b_{i2}m + b_{i3}, \quad i = 0 \dots 5, \quad (8)$$

де  $b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}$  – коефіцієнти апроксимації параметрів  $a_i$ , які не залежать від  $m$ .

В разі підстановки (8) в (7) отримуємо квадратне рівняння:

$$Bm^2 + Cm + D = 0, \quad (9)$$

де

$$B = \sum_{i=0}^5 b_{i1} = b_{01} + b_{11} + b_{21} + b_{31} + b_{41} + b_{51} =$$

$$= -195,9 - 2,05HB_{3000} + 4,73HB_{250} + 0,0025HB_{3000}^2 + 0,0022HB_{250}^2 - 0,00528HB_{3000}HB_{250},$$

$$C = \sum_{i=0}^5 b_{i2} = -133,8 + 0,0413HB_{3000} + 0,194HB_{250} - 0,000021HB_{3000}^2 + 0,00015HB_{250}^2 - 0,0001HB_{3000}HB_{250},$$

$$D = \sum_{i=0}^5 b_{i3} = -HL + 91,067 - 0,0585HB_{3000} + 0,383HB_{250} + 0,000228HB_{3000}^2 + 0,00028HB_{250}^2 - 0,000536HB_{3000}HB_{250}. \quad (10)$$

Розв'язання (9) дає значення показника швидкісного зміцнення

$$m = \frac{-C + \sqrt{C^2 - 4BD}}{2B}. \quad (11)$$

#### Методика

Для визначення динамічної кривої зміцнення металів у вигляді степеневі залежності (3) необхідно:

а) виміряти статичну твердість за Брінеллем  $HB_{3000}$ ,  $HB_{250}$  при зусиллях  $29,43$  кН ( $3000$  кгс) і  $2,453$  кН ( $250$  кгс) на сталевий кульовий індентор діаметром  $0,010$  м;

б) виміряти динамічну твердість за Лібом  $HL$  (енергія удару  $11$  мДж, кульовий ударник діаметром  $3$  мм, масою  $5,5$  грама);

в) розрахувати параметри статичної кривої зміцнення  $A$  і  $n$  чисельно розв'язавши систему рівнянь (4), (5);

г) розрахувати величини  $B$ ,  $C$ ,  $D$  (10) і визначити показник швидкісного зміцнення  $m$  (11).

Якщо крива зміцнення металу для квазістатичних умов відома, то слід апроксимувати її степеневою функцією  $\sigma_i = Ae_i^n$ ; далі розрахувати  $HB_{3000}$ ,  $HB_{250}$  за (4) (5); виміряти  $HL$ ; виконати пункт г).

#### Перевірка

Перевірку запропонованого методу виконали для сталей: ШХ15, Х18Н9Т, 20Х, Сталь 20, Сталь 45. Вимірювання твердості  $HB$  проводили за допомогою стандартного твердоміру Брінелля, твердість за Лібом – з використанням переносного твердоміру ТЕМП-4. Статичну криву зміцнення будували шляхом випробування коротких зразків на стискування в спеціальному пристрої з використанням прокладок зі свинцю, міді і фторопласту. Динамічну криву зміцнення будували з використанням унікального динамічного стенду ударної дії, що забезпечує різні швидкості навантаження, задавали швидкість деформацій у випробуваннях  $500$  с<sup>-1</sup>.

Так, для сталі ШХ15 у стані постачання отримано такі експериментальні значення:  $HB_{3000} = 2011$  МПа,  $HB_{250} = 1560$  МПа,  $HL = 497$ ,  $A = 1250$  МПа,  $n = 0,21$ ,  $m = 0,033$ . Розраховані значення склали  $A = 1300$  МПа,  $n = 0,23$ ,  $m = 0,03$  (рис. 1, крива 1). Похибка визначення параметрів:  $A$  – 4%,  $n$  – 9,5%,  $m$  – 10%. Аналогічну точність мають  $A$ ,  $n$  і  $m$ , які отримані для решти досліджених матеріалів.

Відзначимо, що однаковим числам стандартної твердості  $HB_{3000}$  відповідають різні значення  $HL$  залежно від величин  $A$  і  $n$ , при рівних показниках швидкісного зміцнення  $m$  (табл. 1). У свою чергу, параметр  $m$  також спричиняє суттєвий вплив на  $HL$  за інших рівних умов. В результаті можна зробити висновок про некоректність переведення чисел твердості  $HL$  в  $HB_{3000}$ , зокрема для матеріалів, що відносяться до однієї групи за хімічним складом.

На рис. 2 показано результат моделювання втиснення кулі, що відповідає випробуванню твердості за Лібом. Якщо не враховувати властивості металу до швидкісного зміцнення, то в розрахунок напружено-деформованого стану (НДС) буде внесена суттєва похибка. Зокрема, в ідентичних умовах, максимальна накопичена інтенсивність деформацій у відбитку складала 1,21 і 1,57 з урахуванням швидкісного зміцнення ( $m = 0,033$ ) і без урахування ( $m = 0$ ) відповідно. Помилка визначення складала 30%. Такий же порядок складають помилки розрахунку глибини деформованого шару, енергосилових параметрів і ступеня використання запасу пластичності, що у свою чергу може вплинути на вибір параметрів при проектуванні відповідних технологічних процесів.

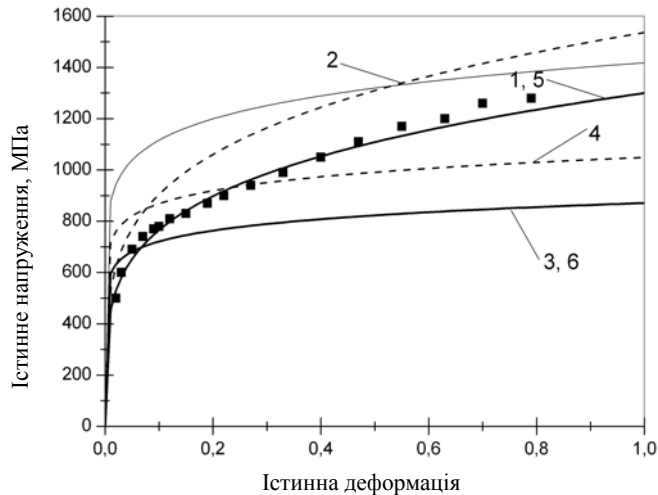


Рис. 1. Криві зміцнення для матеріалів, що мають різні криві зміцнення і однакову твердість  $HB_{3000} = 2011$  МПа в квазістатичних (криві 1, 3) і динамічних (криві 2, 4, 5, 6) умовах. Точками показані дані статичних випробувань сталі ШХ15. Характеристики кривих зведені в таблиці 1

Таблиця 1

Характеристики матеріалу до рис. 1

Номер кривої (за рис. 1)	$HB_{3000}$ , МПа	$HB_{250}$ , МПа	$HL$	$A$ , МПа	$n$	$m$	$\dot{\epsilon}_i, c^{-1}$
1	2011	1560	497	1300	0,23	0,03	0,01
2		1560	497	1300	0,23	0,03	500
3		1800	548	871	0,082	0,03	0,01
4		1800	548	871	0,082	0,03	500
5		1560	488	1300	0,23	0	500
6		1800	537	871	0,082	0	500

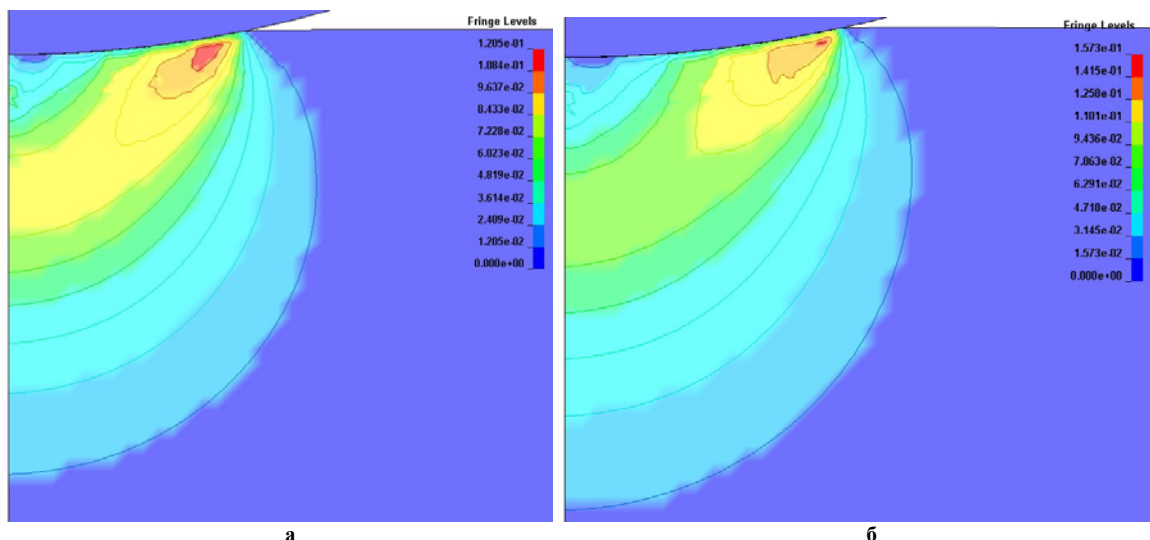


Рис. 2. Розподіл накопиченої інтенсивності деформацій при втисненні кулі в матеріал, що має швидкісне зміцнення (а) ( $m = 0,033$ ) і за його відсутністю (б) ( $m = 0$ ).  $A = 1250$  МПа,  $n = 0,21$

**Висновки**

1. Швидкісне зміцнення металу спричиняє суттєвий вплив на НДС для процесів ХПД з високими швидкостями деформацій, що слід враховувати під час їх дослідження і розрахунку.
2. Функціональний зв'язок між твердістю за Брінелем і Лібом для різних груп металів в загальному вигляді відсутній. В результаті, переведення чисел твердості  $HL$  в  $HB$  (або інші шкали твердості) без додаткових умов може внести до результату похибку невизначеної величини. Можна допустити, що числа  $HL$

і *НВ* мають високий ступінь кореляції лише для сталей певного класу, хімічного складу і умов термообробки.

3. Використання вимірювання твердості для отримання динамічної кривої зміцнення ґрунтується на експериментальних даних вимірювання твердості за Лібом. Статична крива зміцнення може бути визначена за твердістю Брінелля при різних навантаженнях або іншими експериментально-розрахунковими методами. Метод має достатню простоту, зручність і може бути запропонований в якості експрес-оціночного для виявлення чутливості матеріалу до швидкісного зміцнення в холодному стані з метою подальшого використання даних для розрахунків процесів ОМТ і моделювання аварійних режимів роботи деталей.

### Література

1. Високошвидкісні методи обробки металів тиском : підручник / [В. А. Тітов, Ю. С. Шамарін, А. І. Долматов та ін.] – К. : КВІЦ, 2010. – 304 с. – ISBN 978-966-2003-59-8.
2. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) : монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак – Винница : Универсум-Винница, 2005. –195 с. – ISBN 966-641-117-2.
3. Хензель А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки давлением : справочник / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М. : Metallurgija, 1982. – 360 с.
4. Огородников В.А. Учет скоростного упрочнения материалов при оценке энергии пластического деформирования элементов конструкции автомобиля / В. А. Огородников, А. В. Грушко, В. В. Захаров // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. – Тула : ТулГУ, 2005. – Вып. 3. – С. 26–33.
5. Муратов Р. Х. Расчетное построение кривых статического и динамического деформирования материалов. Часть I. Условные кривые статического деформирования / Р. Х. Муратов // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 9. – С. 32–35. –ISSN 0131-1336.
6. Грушко А. В. Определение параметров скоростного упрочнения материала по его твердости / А. В. Грушко // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ „ХПІ”, 2011. – № 45. – С. 119–124. – ISSN 2079–5459.
7. John O. Hallquist. LS-DYNA theoretical manual. Livermore Software Technology Corporation. 1998.
8. Марковец М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М. : Машиностроение, 1979. – 191 с.
9. Bach Fr.-W., Schaper M., Nuernberger F., Krause Chr., Grydin O. Bestimmung der Streckgrenze und der Hall-Petch-Konstanten des Verguetungsstahles 42CrMo4 unterschiedlichen Gefueges mittels Eindruckpruefungen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie. 2006. № 37 (8). P. 668–673.
10. Грушко А. В. О связи исходной твердости и кривой течения материала / А. В. Грушко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2009. – № 3. – С. 35–40. – ISSN 2226-9150.
11. Грушко А. В. Развитие использования метода твердости по Бринеллю для определения напряжения текучести при холодной деформации / А. В. Грушко // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. – 2013. – № 1. – С. 36–39.
12. Грушко А.В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам / А.В. Грушко // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Серія: "Машиностроение". – 2010. – № 60. – С. 133–137. – ISSN 2305-9001.

### References

1. Visokoshvidkisni metodi obrobki metaliv tiskom: Pidruchnik / V. A. Titov, Ju. C. Shamarin, A. I. Dolmatov ta in. – Kіiv: KVIC, 2010. – 304 s. – ISBN 978-966-2003-59-8.
2. Ogorodnikov V. A. Jenergija. Deformacii. Razrushenie (zadachi avtotehnicheskoi jekspertizy) : monografija / V. A. Ogorodnikov, V. B. Kiselev, I. O. Sivak – Vinnica : Universum-Vinnica, 2005. –195 s. – ISBN 966-641-117-2.
3. Henzel' A. Raschet jenergosilovyh parametrov v processah obrabotki davleniem: Spravochnik / A. Henzel', T. Shpittel'. – M. : Metallurgija, 1982. – 360 s.
4. Ogorodnikov V.A. Uchet skorostnogo uprochnenija materialov pri ocenke jenerгии plasticheskogo deformatsionnogo jelementov konstrukcii avtomobilja / V. A. Ogorodnikov, A. V. Grushko, V. V. Zaharov // Izvestija TulGU. Serija. Mehanika deformiruемого tverdogo tela i obrabotka metallov davleniem. – Tula: TulGU. Vyp. 3. – 2005. – S. 26-33.
5. Muratov R. H. Raschetnoe postroenie krivyh staticheskogo i dinamičeskogo deformirovanija materialov. Chast' I. Uslovnye krivye staticheskogo deformirovanija / R. H. Muratov // Tjazeloe mashinostroenie. - 2012. - № 9. - S. 32-35 : il. - Bibliogr.: s. 35 (9 nazv.). - ISSN 0131-1336.
6. Grushko A. V. Opredelenie parametrov skorostnogo uprochnenija materiala po ego tverdosti / A. V. Grushko // Visnik NTU «HPI» tematichnij vipusk: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah. - Harkiv: NTU „HPI” – 2011. - №45. – S. 119-124. – ISSN 2079-5459.
7. John O. Hallquist. LS-DYNA theoretical manual / John O. Hallquist. Livermore Software Technology Corporation. – 1998.
8. Markovec M. P. Opredelenie mehanicheskijh svojstv metallov po tverdosti / M. P. Markovec – M.: Mashinostroenie, 1979. – 191 s.
9. Bestimmung der Streckgrenze und der Hall-Petch-Konstanten des Verguetungsstahles 42CrMo4 unterschiedlichen Gefueges mittels Eindruckpruefungen / Fr.-W. Bach, M. Schaper, F. Nuernberger, Chr. Krause, O. Grydin // Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie. – 2006. – №37 (8). – P. 668-673.
10. Grushko A. V. O svjazi ishodnoj tverdosti i krivoj tečenija materiala / A. V. Grushko // Herald of Khmelnytsky National University. – Hmel'nic'kij : HNU, 2009. – № 3. – S. 35–40. – ISSN 2226-9150.
11. Grushko A. V. Razvitie ispol'zovanija metoda tverdosti po Brinellju dlja opredelenija naprjazhenija tekučestij pri holodnoj deformatsii / A. V. Grushko // Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'. – 2013. – №1 – S.36-39.
12. Grushko A.V. Opredelenie krivoj tečenija materiala po standartnym mehanicheskim harakteristikam / Grushko A.V. // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraini "KPI". Serija: "Mashinostroenie" – 2010 - №60. – S. 133-137. – ISSN 2305-9001.

Рецензія/Peer review : 4.11.2014 р.

Надрукована/Printed :29.11.2014 р.  
Рецензент: д.т.н., проф., І.О. Сивак