

О.А. КАТОК, Р.В. КРАВЧУК

Інститут проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України, Київ

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДИК ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ ДИСКОВИХ МІКРОЗРАЗКІВ

В даній роботі проведено порівняльний аналіз ряду методик визначення характеристик міцності сталей методом продавлювання дискових мікроразків. Дослідження проводились з використанням матеріалів сталей 45, 10ГН2МФА та 15Х2НМФА. Визначено значення характеристик міцності цих матеріалів з використанням різних методик. Показано, що відхилення значень характеристик міцності даних матеріалів, які визначено методом продавлювання дискових мікроразків з використанням найбільш поширених методик, від таких, отриманих при випробуванні на розтяг, у більшості випадків перевищує 10%. Отримані результати будуть використані у подальших дослідженнях для розробки рекомендацій щодо використання проаналізованих методик.

**Ключові слова:** small punch test, дисковий мікроразок, характеристики механічних властивостей, границя текучості, границя міцності, сталь.

О.А. КАТОК, R.V. KRAVCHUK

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, Kyiv, Ukraine

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES DETERMINATION METHODS BY SMALL PUNCH TEST

Ensuring reliable operation of dangerous objects during or beyond the source life is a very important task in the context of the current economic situation in the Ukrainian energy sector. For this purpose, continuous full-scale monitoring of the main and additional equipment state of power plants is carried out in accordance with the normative documents. Estimation of the current state of materials is carried out according to certain parameters. One of these parameters is the value of the mechanical properties. Determining the mechanical properties of structures materials by the results of uniaxial tension tests is not always possible as it requires, in most cases, the destruction of the structure, the availability of sufficient volume of material for the production of specimen and complex and expensive testing equipment. To avoid the aforementioned limitations, new indirect methods for determining the mechanical properties are developed. Among them – the small punch test. Today, a number of different methods have been developed for determining the mechanical properties of materials based on the results of small punch test. In this paper, a comparative analysis of the most common methods for determining the strength properties of steels by small punch test. The research was carried out using materials of different strength – steel 45, 10HN2MFA and 15X2NMFA. The deviation value was determined in the strength properties determining of these materials using different methods. It has been shown that the deviation of the strength properties of these materials, which is determined by small punch test using the most common techniques, from those obtained during the tensile test, exceeds 10%. The results will be used in further studies to improve the correlation dependencies in the determination of mechanical properties by small punch test.

**Keywords:** small punch test, microspecimen, mechanical properties, yield strength, ultimate strength, steel.

### Вступ

Забезпечення надійної експлуатації об'єктів підвищеної небезпеки в проектній та понадпроектній строк служби є дуже важливою задачею в контексті сучасної економічної ситуації в енергетичному секторі України. Для цього проводиться постійний всебічний моніторинг стану основного та допоміжного обладнання енергетичних установок, що здійснюється згідно відповідних нормативних документів. Оцінка поточного стану матеріалів конструкцій проводиться за певними параметрами. Одними з таких параметрів є значення характеристик механічних властивостей.

Визначення механічних характеристик матеріалів реальних конструкцій за результатами випробувань на одновісний розтяг не завжди можливе так як потребує в більшості випадків руйнування конструкції, наявності достатнього об'єму матеріалу для виготовлення зразків і складної та дорогавартісної випробувальної техніки. Для уникнення вищезгаданих обмежень розробляються нові непрямі методи визначення механічних характеристик. Серед них – метод продавлювання дискового мікроразка. Суть методу полягає у виготовленні мініатюрного дискового зразка товщиною  $t$  із мінівірізок досліджуваного матеріалу, який закріплюється у відповідному затискному пристрої та піддається деформуванню індентором у формі кулі радіуса  $r$  із записом діаграми процесу продавлювання. За параметрами цієї діаграми із використанням кореляційних залежностей визначаються характеристики механічних властивостей матеріалу. На сьогоднішній день розроблено цілий ряд різних способів визначення механічних властивостей матеріалів за результатами випробувань дискових мікроразків на продавлювання.

Японські вчені Мао і Такахаші [1] у 1987 р. запропонували методику визначення умовної границі текучості методом індентування дискового мікроразка для легованих сталей. Ними було отримано лінійну кореляційну залежність між значенням умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$  при розтягу зразка та величиною навантаження  $F_y$  на дисковий мікроразок в момент переходу від пружної до пружно-пластичної деформації:

$$\sigma_{0,2} = \alpha \frac{F_y}{t^2}, \text{ МПа} \quad (1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт матеріалу, рівний для легованих сталей 0,36,  $t$  – товщина зразка.

З метою зменшення розкиду значень умовної границі текучості, оціненої за результатами продавлювання дискового мікроразка, кореляційна залежність (1) за останні роки неодноразово уточнювалася. Так, наприклад, Спаєтїг та його колеги, запропонували при визначенні умовної границі текучості реакторних сталей використовувати коефіцієнт  $\alpha$  рівний 0,375 [2].

Лакалле та його колеги для визначення умовної границі текучості за результатами продавлювання дискових мікроразків запропонували кореляційну залежність, у якій окрім навантаження  $F_y$  і товщини зразка  $t$  фігурує коефіцієнт Пуассона  $\mu$  [3]:

$$\sigma_{0,2} = 1,16(1 + \mu) \frac{F_y}{t^2}, \text{ Мпа} \quad (2)$$

Інша емпірична залежність була представлена китайськими вченими Ванг і Ші в роботі [4]. В експериментально отриманій залежності присутній новий параметр – радіус кульки індентора  $r$ :

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_y - 94,37}{0,158 \cdot 2\pi r t}, \text{ Мпа} \quad (3)$$

Аналогічну залежність, але теоретичним шляхом, ґрунтуючись на теорії пластин та оболонки, було отримано шведськими вченими для низьколегованої сталі 1Cr-0,5Mo та аустенітної нержавіючої сталі 18Cr-9Ni [5]:

$$\sigma_{0,2} = \frac{3F_y(1 + \mu)}{2\pi t^2} \ln \frac{D}{2r'}, \text{ Мпа} \quad (4)$$

де  $D$  – діаметр отвору в нижній затискній втулці, а  $r'$  – ефективний радіус рівномірно розподіленого навантаження в центрі мікроразка:

$$r' = \sqrt{1,6r^2 + t^2} - 0,675t, \text{ мм}$$

Емпірична залежність, яка враховує коефіцієнт Пуассона  $\mu$ , радіус індентора  $r$  та діаметр отвору нижньої затискної втулки  $D$ , була представлена Ассасом та авторами [6]:

$$\sigma_{0,2} = 1,5(1 + \mu) \frac{F_{\max}}{\pi t^2} \left[ \ln \frac{0,5D}{0,8r} + \left( \frac{0,8r}{D} \right)^2 \right], \text{ Мпа} \quad (5)$$

Границя міцності методом продавлювання дискових мікроразків визначається кореляційною залежністю між значенням границі міцності при розтягу та параметрами діаграми деформування дискового мікроразка. Японські вчені Мао і Такахаші [1] запропонували визначати границю міцності за такою кореляційною залежністю:

$$\sigma_b = \beta_1 \frac{F_{\max}}{t^2} + \beta_2, \text{ Мпа} \quad (6)$$

де  $F_{\max}$  – максимальне навантаження на дисковий мікроразок перед руйнуванням,  $\beta_1$  і  $\beta_2$  – коефіцієнти, рівні відповідно 0,13 і -320 для легованих сталей.

Експериментуючи з конструкційними сталями S460N, E690, Grade A і алюмінієвим сплавом AlCuMg іспанські вчені запропонували нову кореляційну залежність для визначення границі міцності, в якій окрім максимального навантаження фігурує навантаження  $F_l$ , що відповідає моменту переходу від пружно-пластичного прогину до мембранного витягування дискового мікроразка на діаграмі деформування [3]:

$$\sigma_b = \alpha \frac{F_l}{t^2} + \beta \frac{F_{\max} - F_l}{t}, \text{ Мпа} \quad (7)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  – коефіцієнти рівні 0,23 і 0,09 відповідно.

Китайськими вченими експериментально отримана кореляційна залежність, в якій присутній новий параметр – радіус кульки індентора  $r$  [4]:

$$\sigma_b = \frac{F_{\max} - 202,17}{0,644 \cdot 2\pi r t}, \text{ Мпа} \quad (8)$$

Вчені Норріс і Паркер [7] в запропонованій кореляційній залежності окрім радіуса кульки індентора використали геометричний параметр затискного пристрою, а саме – діаметр отвору нижньої затискної втулки  $D$ :

$$\sigma_b = \frac{F_{\max}}{t[4,64r - 0,9(D - 2(r + t)) + 0,56]}, \text{ Мпа} \quad (9)$$

Естонський вчений Клевцов [8] запропонував значення границі міцності визначати як функцію від величини максимального навантаження:

$$\sigma_b = 0,184F_{\max}, \text{ Мпа} \quad (10)$$

На відміну від інших кореляційних залежностей в формулі (10) не врахована товщина зразка, що обмежує її застосування.

Вчений Родрігез разом з колегами [9] запропонували свої значення коефіцієнтів  $\beta_1$  і  $\beta_2$  в рівнянні (6) 0,077 і 218 відповідно.

**Метою даної роботи** було проведення порівняльного аналізу ряду методик визначення характеристик механічних властивостей за результатами випробувань дискових мікрорізків та оцінка їх достовірності за результатами випробувань на одновісний розтяг.

**Матеріали, зразки, обладнання та методика випробувань**

Об'єктом дослідження було обрано вуглецеву сталь 45 та дві марки теплостійких сталей ферито-перлітного типу 10ГН2МФА та 15Х2НМФА, які широко використовуються для виготовлення конструкцій та відповідального обладнання АЕС.

Зразки для випробувань, методика та визначення характеристики механічних властивостей сталей за даними випробувань на одновісний розтяг із вище згаданих матеріалів здійснювались згідно [10]. Випробування на одновісний розтяг проводились на універсальній сервогідролінійній машині Instron 8802 (рис. 2а). Вимірювання деформації зразків здійснювалось тензометром з базою 50 мм. Швидкість переміщення рухомого захвату складала 0,02 мм/хв.

Заготовки для мікрорізків виготовлялись із мінівирізків. Товщина заготовки складала не менше, ніж 1,5 товщини зразка. Для випробувань методом продавлювання дискового мікрорізка використовувались зразки діаметром  $d = 8$  мм та товщиною  $h = 0,5$  мм. Креслення зразка та схема його закріплення в затискному пристрої зображені на рис. 1. Непаралельність робочих поверхонь (поверхня контакту кульки із мікрорізком і поверхня контакту мікрорізка із нижньою втулкою затискного пристрою) не перевищувала 0,001 мм. Граничне відхилення по товщині з механічно обробленими робочими поверхнями було не більше  $\pm 0,005$  мм. Випробування методом продавлювання дискового мікрорізка проводились згідно [11] на розробленій в Інституті проблем міцності імені Г. С. Писаренка НАН України установці UTM-20НТ (рис. 2б).

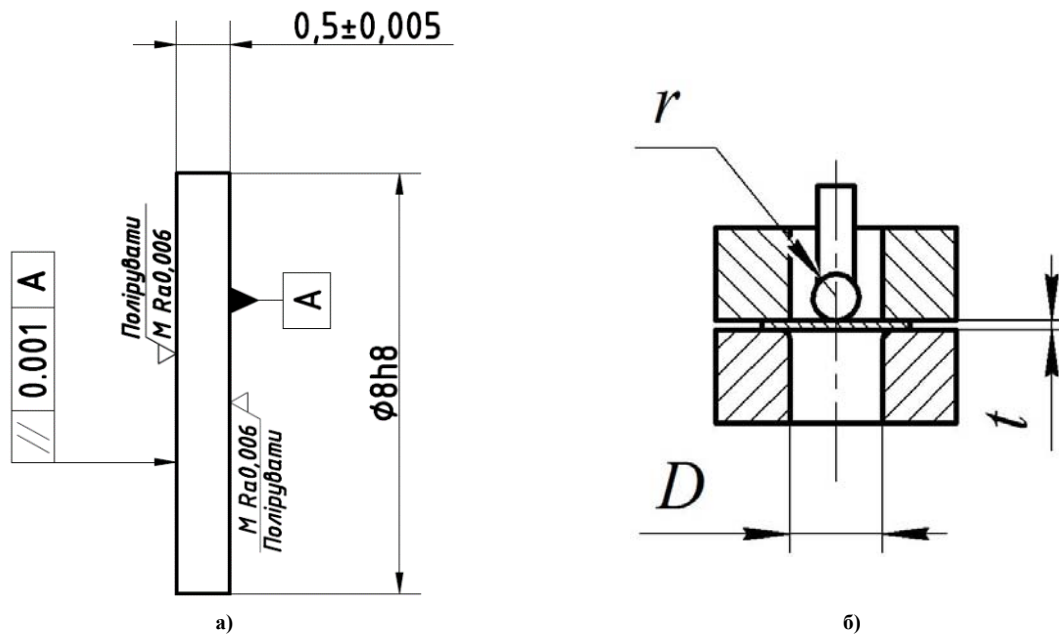


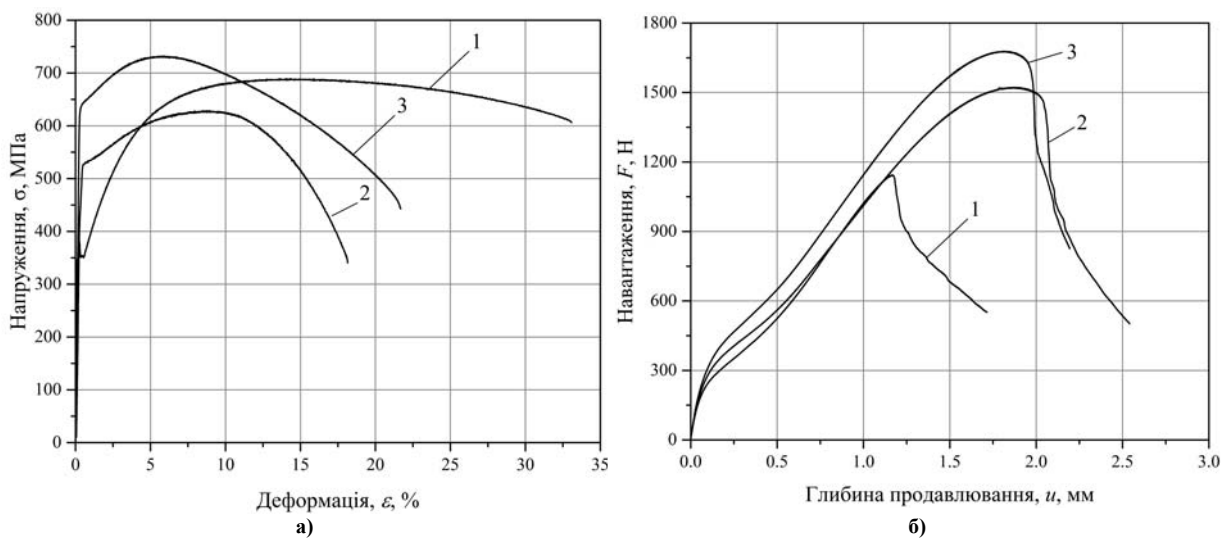
Рис. 1. Креслення дискового мікрорізка (а) та схема закріплення зразка в затискному пристрої (б):  $r$  – радіус індентора,  $t$  – товщина зразка,  $D$  – діаметр нижньої затискної втулки

**Результати випробувань та їх обговорення**

Порівняльний аналіз методик оцінки міцності матеріалів проводився шляхом зіставлення результатів визначення характеристик механічних властивостей конструкційних сталей за діаграмами деформування циліндричних зразків на розтяг з результатами оцінки тих же характеристик, визначених за діаграмами деформування дискових мікрорізків. Типові діаграми деформування на розтяг та продавлювання сталей 45, 10ГН2МФА та 15Х2НМФА представлено на рис. 3.



а) б)  
Рис. 2. Випробувальне обладнання: а) Instron 8802, б) UTM-20HT



а) б)  
Рис. 3. Типові діаграми деформування зразків із сталей 45 (1), 10ГН2МФА (2) та 15Х2НМФА (3): а) одновісний розтяг; б) продавлювання дискових мікрозразків

Значення характеристик механічних властивостей конструкційних сталей, отримані шляхом випробувань зразків на розтяг та методом продавлювання дискових мікрозразків приведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

**Порівняльні результати визначення границі текучості  $\sigma_{0,2}$ , Мпа, конструкційних сталей, визначених різними методиками**

Марка сталі	Одновісний розтяг	Продавлювання дискових мікрозразків за методиками					
		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]
45	<b>353,9</b>	<b>344,8</b>	<b>359,2</b>	1388,8	228,0	236,3	432,0
10ГН2МФА	<b>528,0</b>	425,9	443,6	1715,4	311,0	290,8	533,5
15Х2НМФА	<b>638,1</b>	489,0	509,4	1969,8	<b>381,2</b>	<b>334,1</b>	612,7

**Порівняльні результати визначення границі міцності  $\sigma_b$ , Мпа, конструкційних сталей визначених різними методиками**

Марка сталі	Одновісний розтяг	Продавлювання дискових мікроразривків за методиками					
		[1]	[3]	[4]	[7]	[8]	[9]
45	<b>687,7</b>	249,1	594,7	347,3	367,0	197,0	555,1
10ГН2МФА	<b>626,9</b>	507,7	728,4	534,2	528,8	280,5	708,2
15Х2НМФА	<b>730,8</b>	590,9	846,9	597,2	582,7	309,5	<b>757,5</b>

Видно, що запропоновані методики для визначення значень умовної границі текучості за діаграмою деформування дискових мікроразривків сталеву кулькою можна використовувати лише для окремих сталей. Наприклад, для сталі 45 найбільш точними виявились методики [1] та [2], відхилення результатів за якими порівняно з даними випробувань циліндричних зразків на розтяг не перевищує 2,6% та 1,5% відповідно, тоді як для сталі 10ГН2МФА – методика [4] з відхиленням 12,1%, а для сталі 15Х2НМФА – методики [4] та [5] з відхиленням 7,7% та 5,6% відповідно. Точність визначення значень границі міцності суттєво нижча. Жодна з описаних методик не має переваг порівняно з іншими. У більшості випадків відхилення між значеннями границі міцності досліджуваних сталей, визначених за результатами випробувань на розтяг і за діаграмами деформування дискових мікроразривків перевищують 10%. Виключення складає методика [9], за якою відхилення для сталі 15Х2НМФА не перевищує 3,7%.

#### Висновки

Таким чином, на основі виконаних експериментальних досліджень на розробленому обладнанні, проведено порівняльний аналіз найбільш поширених методик визначення характеристик механічних властивостей сталей 45, 10ГН2МФА та 15Х2НМФА за діаграмами деформування дискових мікроразривків. Визначено відхилення результатів випробувань із використанням цих методик. Показано, що відхилення значень характеристик механічних властивостей, які визначено методом продавлювання дискових мікроразривків з використанням найбільш поширених методик, від таких, отриманих при випробуванні на розтяг, в більшості випадків перевищує 10%. Отримані результати будуть використані у подальших дослідженнях для розробки рекомендацій щодо використання проаналізованих методик.

#### Література

1. Mao X. Development of a further-miniaturized specimen of 3mm diameter for TEM disk small punch tests / X. Mao, H. Takahashi // Journal of Nuclear Materials. – 1987. – Volume 150. – P. 42–52. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90092-4).
2. Spaetig P. Assessment of plastic flow and fracture properties with small specimen test techniques for IMIX-designed specimens / P. Spaetig, E. Campitelli, R. Bonade, N. Baluc // Nuclear Fusion. – 2005. – Volume 45. – P. 635–641. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/45/7/011>.
3. Lacalle R. Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos / R. Lacalle, J. García, J. A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana // XXVI Encuentro del Grupo Español de Fractura «Anales de Mecánica de la Fractura». – 2009. – Volume 2. – P. 501–506.
4. Wang Z.-X. Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses / Z.-X. Wang, H.-J. Shi, J. Lu, P. Shi, X.-F. Ma // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – Volume 238. – P. 3186–3193. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.07.013>.
5. Eskner M. Mechanical Property Evaluation Using the Small Punch Test / M. Eskner, R. Sandström // Journal of Testing and Evaluation. – 2004. – Volume 32(4). – P. 282 – 289. – DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE11504>.
6. Assas M. M. Identification of mechanical characteristics of materials using diminutive specimen-an empirical study / M. M. Assas, A. Husian, D. K. Sehgal // Procedia Engineering. – 2011. – Volume 10. – P. 3109–3116. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.515>.
7. Norris S. D. Deformation processes during disc bend loading / S. D. Norris, J. D. Parker // Materials Science and Technology. – 1996. – Volume 12(2). – P. 163–170. – DOI: <https://doi.org/10.1179/mst.1996.12.2.163>.
8. Klevtsov I. Measurement of the tensile and yield strength of boiler steels by small punch and tensile test methods / I. Klevtsov, A. Dedov, A. Molodtsov // Estonian Journal of Engineering. – 2004. – Volume 15(2). – P. 99–107. – DOI: 10.3176/eng.2009.2.03.
9. Rodríguez C. Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test / C. Rodríguez, J. García, E. Cabezas, F. Cárdenas, J. Belzunce, C. Betegón // Welding Journal. – 2009. – Volume 88. – P. 188–192.
10. Металеві матеріали. Випробування на розтяг. Частина 1: Метод випробування за кімнатної температури (EN 10002-1:2004, IDT) : ДСТУ EN 10002-1:2006. – [Чинний від 2008–01–07]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2008. – 34 с. – (Національний стандарт України).
11. CWA 15627:2007 Small Punch Test Method for Metallic Materials // CEN Workshop Agreement. – 2007.

## References

1. Mao X. Development of a further-miniaturized specimen of 3mm diameter for TEM disk small punch tests / X. Mao, H. Takahashi // *Journal of Nuclear Materials*. – 1987. – Volume 150. – P. 42 – 52. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(87\)90092-4](https://doi.org/10.1016/0022-3115(87)90092-4).
2. Spaetig P. Assessment of plastic flow and fracture properties with small specimen test techniques for IMMIX-designed specimens / P. Spaetig, E. Campitelli, R. Bonade, N. Baluc // *Nuclear Fusion*. – 2005. – Volume 45. – P. 635 – 641. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/45/7/011>.
3. Lacalle R. Obtención mediante el ensayo small punch de las propiedades de tracción de materiales metálicos / R. Lacalle, J. García, J. A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana // *XXVI Encuentro del Grupo Español de Fractura «Anales de Mecánica de la Fractura»*. – 2009. – Volume 2. – P. 501 – 506.
4. Wang Z.-X. Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses / Z.-X. Wang, H.-J. Shi, J. Lu, P. Shi, X.-F. Ma // *Nuclear Engineering and Design*. – 2008. – Volume 238. – P. 3186 – 3193. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.07.013>.
5. Eskner M. Mechanical Property Evaluation Using the Small Punch Test / M. Eskner, R. Sandström // *Journal of Testing and Evaluation*. – 2004. – Volume 32(4). – P. 282 – 289. – DOI: <https://doi.org/10.1520/JTE11504>.
6. Assas M. M. Identification of mechanical characteristics of materials using diminutive specimen-an empirical study / M. M. Assas, A. Husian, D. K. Sehgal // *Procedia Engineering*. – 2011. – Volume 10. – P. 3109 – 3116. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.515>.
7. Norris S. D. Deformation processes during disc bend loading / S. D. Norris, J. D. Parker // *Materials Science and Technology*. – 1996. – Volume 12(2). – P. 163 – 170. – DOI: <https://doi.org/10.1179/mst.1996.12.2.163>.
8. Klevtsov I. Measurement of the tensile and yield strength of boiler steels by small punch and tensile test methods / I. Klevtsov, A. Dedov, A. Molodtsov // *Estonian Journal of Engineering*. – 2004. – Volume 15(2). – P. 99 – 107. – DOI: 10.3176/eng.2009.2.03.
9. Rodríguez C. Mechanical Properties Characterization of Heat-Affected Zone Using the Small Punch Test / C. Rodríguez, J. García, E. Cabezas, F. Cárdenas, J. Belzunce, C. Betegón // *Welding Journal*. – 2009. – Volume 88. – P. 188 – 192.
10. Metalevi materialy. Vyprobuvannja na rozťjagh. Chastyna 1: Metod vyprovovuvannja za kimnatnoji temperatury (EN 10002-1:2004, IDT) : DSTU EN 10002-1:2006. – [Chynnyi vid 2008–01–07]. – Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. – 34 c. – (Natsionalnyi standart Ukrainy).
11. CWA 15627:2007 Small Punch Test Method for Metallic Materials // CEN Workshop Agreement. – 2007.

Рецензія/Peer review : 10.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 2.6.2019 р.

Рецензент: д.т.н. Новогрудський Л.С.