

УДК 539.4

О.П. Гопкало¹, канд. техн. наук; П. Юхимець², канд. техн. наук;
О. Бернацький²; О.Є. Гопкало¹; О. Каток¹, канд. техн. наук;
Р. Дмитриєнко²

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України

²Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОЦІНЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ ТРУБОПРОВОДУ ЗІ СТАЛІ 17Г1С-У ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Резюме. Наведено результати експериментального визначення характеристик короточасної статичної міцності та пластичності металу трубопроводу з подовжнім заводським зварним швом. Встановлено, що характеристики міцності та пластичності основного металу трубопроводу та металу зварного шва залежать від напрямку прокату та форми лабораторних зразків. Визначення характеристик міцності металу трубопроводу неруйнівним методом інструментованого індентування добре узгоджуються з даними механічних випробувань.

Ключові слова: границя міцності, умовна границя текучості, відносне подовження, відносне звуження, інструментоване індентування.

О.Р. Gopkalo¹, Р. Yuchsmetz², О. Bernatsky², О.Е. Gopkalo¹,
О. Katok¹, R. Dmitriyenko²

EXPERIMENTAL EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF THE METAL OF PIPELINE OF STEEL 17G1S-U AFTER LONG-TERM OPERATION

The summary. The results are presented for the experimental determination of the short-term static strength and ductility of the metal in the longitudinal and transverse directions of the pipe of steel 17G1S-U with a factory-made longitudinal welded joint after a long operation. Specimen blanks were cut out of a piece of the pipe of 530 x 8 mm in diameter. The mechanical properties of the base metal (BM) and the metal in the specific areas of the welded joint: weld metal (WM) and the metal of the heat-affected zone (HAZ) were determined in the transverse direction of the pipe. The mechanical properties of the BM and WM were determined in the longitudinal direction of the pipe. The strength and plasticity characteristics of the pipe metal were determined by conventional tensile testing of laboratory specimens and a nondestructive instrumented indentation technique.

For conventional tensile tests, flat specimens (with a treated and untreated test portion), both full-sized cylindrical specimens and those with a shortened test portion (for weld zones) were used. The strength characteristics of the BM were determined by a nondestructive instrumented indentation technique, whereas the strength of the specific areas of the welded joint was determined under static and cyclic loading conditions using a ball indenter of D = 2.5 mm.

It is found that the mechanical treatment of both surfaces of the flat specimen of the BM increases the ultimate strength by 4.8%, the offset yield stress by 7.6% and the reduction of area by 16% as compared to the specimen with an untreated surface. The machining of the external or internal surface of the flat specimen increases the ultimate strength only by 1.2% as compared to that with an untreated surface. Tensile tests of specimens with a treated surface (flat and cylindrical specimens) of the BM and WM give a higher ultimate strength (by 6.3-7.6%) as compared to the similar data obtained for flat specimens having the BM without surface treatment, regardless of the rolling direction.

The data obtained in testing of cylindrical specimens cut out in the transverse direction of the pipe and having a shortened test portion for the BM and WM exhibit higher ultimate strength and offset yield stress (by 5.46% and 2.86% and 8.7% and 9.05%) and lower reduction of area by 11.42% and 14.42% as compared to the corresponding characteristics obtained for full-sized cylindrical specimens in the longitudinal direction of the pipe.

The determination of the strength characteristics of the pipeline metal by a nondestructive instrumented indentation technique agrees well with the data of conventional mechanical tests.

Key words: *ultimate tensile strength, yield tensile strength, unit elongation, reduction of area, indentation.*

Вступ. Експертне оцінювання технічного стану діючих трубопроводів після тривалої експлуатації проводять за певними методиками, які містять визначення характеристик короткочасної статичної міцності та пластичності матеріалу. На значення вказаних характеристик впливають технологічні (виготовлення труби й монтаж трубопроводу) та експлуатаційні (наявність і тривалість статичного та пульсуючого внутрішнього тиску транспортованого продукту, просадки ґрунтів, агресивного середовища, температури, динамічних навантажень від обладнання та ін.) фактори.

Для магістральних трубопроводів встановлено, що у багатьох випадках руйнування металу труб відбулося поза структурно-гетерогенною зоною у напрямку твірної труби на відстані 0–20 мм від лінії сплавлення поздовжнього зварного шва труб, виконаного в заводських умовах [1].

У даній роботі проведено експериментальне визначення характеристик короткочасної статичної міцності та пластичності основного металу та металу з характерних зон зварного з'єднання магістрального трубопроводу зі сталі 17Г1С-У після тривалої експлуатації. Характеристики міцності та пластичності металу трубопроводу визначали випробуванням лабораторних зразків на розтяг та неруйнівним методом інструментованого індентування.

Лабораторні зразки та методики випробувань. Заготовки для зразків вирізували як у поперечному, так і поздовжньому напрямках фрагмента труби Ø530 x 8 мм, яка має повздовжній заводський зварний шов. У поперечному напрямку труби визначали механічні властивості основного металу (ОМ) та металу характерних зон зварного з'єднання: метал зварного шва (МШ) та металу зони термічного впливу (ЗТВ). У поздовжньому напрямку труби визначали механічні властивості ОМ та МШ. Неробочі (захватні частини зразка) ділянки заготовок зразків із ОМ та зі зварним з'єднанням, вирізані у поперечному напрямку труби, випрямляли для дотримання співвісності захватних та робочих частин зразка. На рис. 1 наведено креслення зразків для випробувань на розтяг та їх зовнішній вигляд після виготовлення.

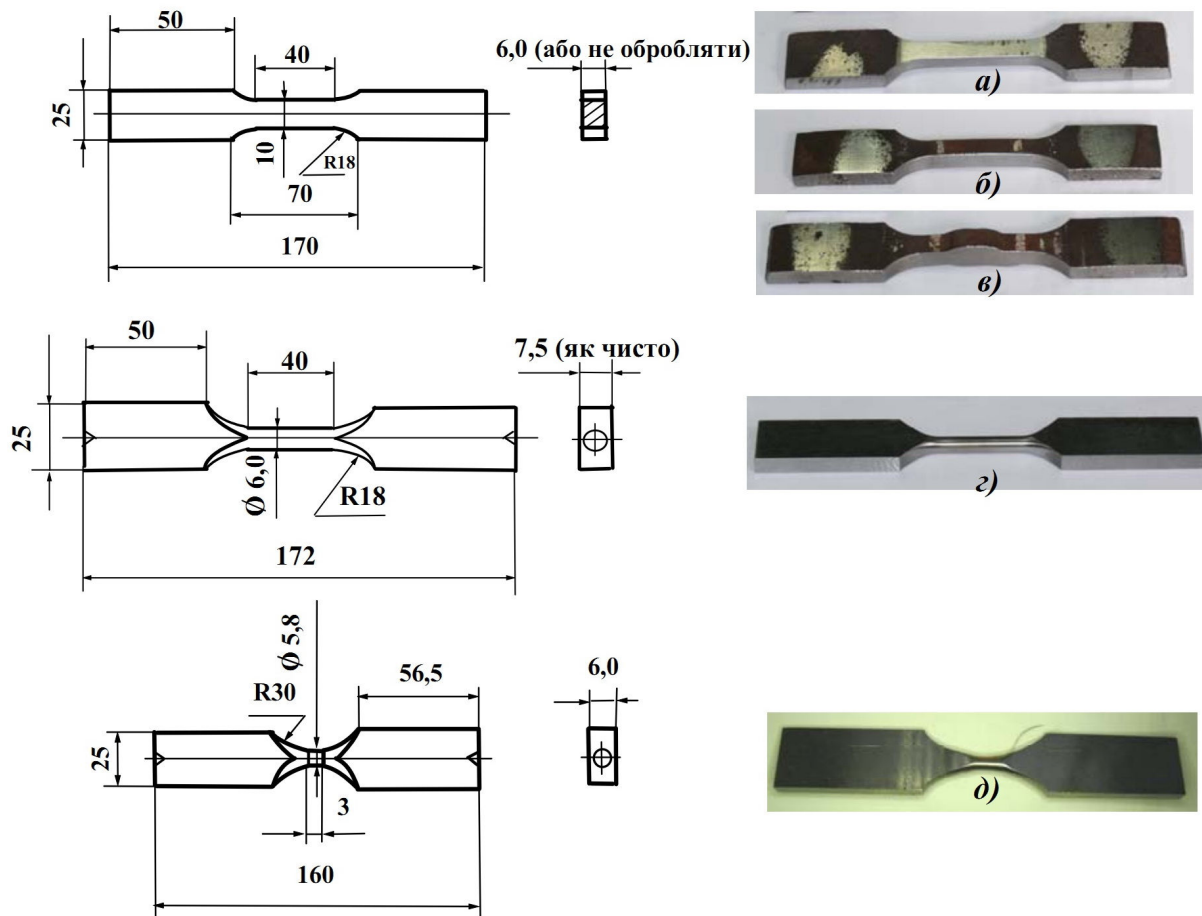


Рисунок 1. Креслення та зовнішній вигляд зразків для випробувань на розтяг: а) зразок з обробкою поверхні робочої частини; б) зразок із ОМ без обробки поверхні робочої частини; в) зразок зі зварним з'єднанням (з поздовжнім заводським швом) без зняття підсилення шва; г) повномірний циліндричний зразок; д) циліндричний зразок із вкороченою робочою частиною

Figure 1. Schematic drawing and appearance of specimens for tensile tests: a) specimen with a treated surface of the test portion, b) specimen with the BM without surface treatment of the test portion, c) specimen with a welded joint (having a longitudinal factory-made weld) without removal of the weld reinforcement, d) full-sized cylindrical specimen, and e) cylindrical specimen with a shortened test portion

Основні розміри зразків для випробувань на розтяг відповідали вимогам ГОСТу 1497-84 [2] (для плоских зразків), стандарту API SPECIFICATION 5L [3] (для циліндричних зразків) та можливостям випробувальної машини та тензометрів. Плоскі зразки з ОМ та зразки зі зварним з'єднанням виготовляли як з механічною обробкою поверхні робочої частини (рис. 1а), так і у вихідному стані (без обробки поверхні робочої частини зразка, рис. 1б, в). Крім того, плоскі зразки вирізані у поперечному напрямку труби із ОМ виготовляли без обробки робочої частини, з обробкою обох поверхонь робочої частини і обробкою зовнішньої або внутрішньої поверхні (відносно труби трубопроводу). Випробування плоских зразків із ОМ та зі зварним з'єднанням із обробленою та необробленою робочою поверхнею дає можливість оцінити вплив технологічного нагартування та геометричних параметрів концентраторів напружень і залишкових напружень від наплавлення на механічні властивості матеріалу труби. Для порівняння впливу форми зразка на механічні характеристики ОМ труби та МШ використовували також циліндричні повномірні зразки (рис. 1г).

З метою визначення механічних характеристик металу характерних зон зварного з'єднання (ЗТВ та МШ) використовували циліндричні зразки з вкороченою робочою ділянкою довжиною 3,0 мм (рис. 1б). Схема розташування робочої ділянки вкороченого циліндричного зразка в ЗТВ зварного з'єднання наведена на рис. 2.

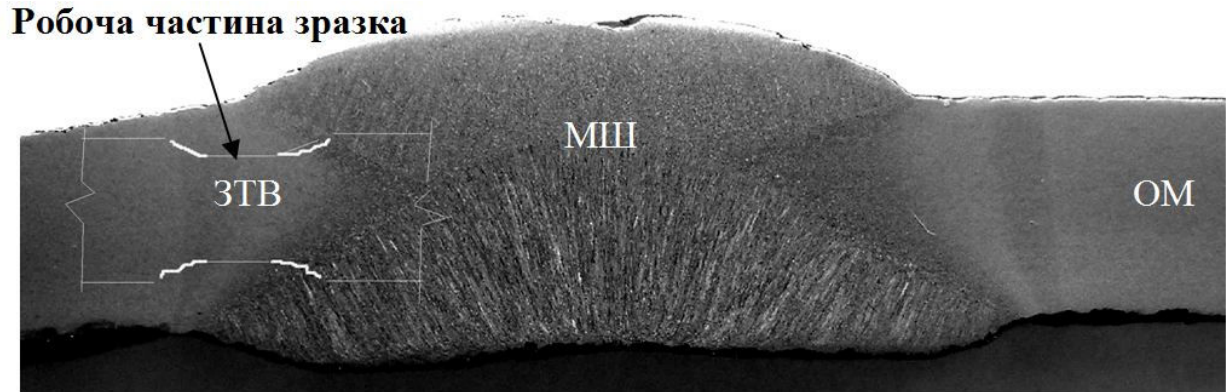


Рисунок 2. Фрагмент зварного з'єднання. Схема розташування робочої частини вкороченого циліндричного зразка в ЗТВ зварного з'єднання

Figure 2. A piece of the welded joint. The location of the test portion of the shortened cylindrical specimen in the HAZ of the welded joint

Випробування на розтягування проводили на стандартній універсальній електрогідравлічній машині 3201УЕ–20 виробництва Армавірського заводу випробувальних машин (Росія), оснащеної контролером фірми *BISS* (Індія) та комп'ютером із відповідним програмним забезпеченням. Деформації в плоских та циліндричних повномірних зразках вимірювали тензометром з базою вимірювання 25 мм, а циліндричних зразків з вкороченою робочою частиною – тензорезисторами з базою 3,0 мм, наклеєними на робочу ділянку.

Характеристики міцності ОМ та характерних зон зварного з'єднання визначали неруйнівним методом інструментованого інденування згідно з ISO 14577-1 [4] при статичному та циклічному режимах навантаження індентором у вигляді кульки $D = 2,5$ мм на лабораторній установці UTM-20НТ [5, 6] за кімнатної температури. Діаграми інденування записували в жорсткому режимі навантаження зі швидкістю переміщення індентора 0,05 мм/хв. Характерну діаграму інденування сталі 17Г1С–У в циклічному режимі навантаження наведено на рис. 3.

Умовну границю текучості $\sigma_{0,2}$ сталі 17Г1С–У визначали за вдосконаленою методикою Хаггага [7]. У результаті отримано кореляційну залежність між границею текучості, що визначена з випробування на розтяг (ГОСТ 1497-84) та параметром A , який характеризує запас пластичності матеріалу в рівнянні, що описує діаграму інденування в координатах $F/d^2 - d/D$ [7]

$$\sigma_{0,2} = a_{\sigma_{0,2}} \cdot A + b_{\sigma_{0,2}},$$

де $a_{\sigma_{0,2}}$ і $b_{\sigma_{0,2}}$ – коефіцієнти, які дорівнюють 0,23 і 0 для сталі 17Г1С–У відповідно.

Границю міцності методом інструментованого інденування визначали за методикою Харченка – Катка [8].

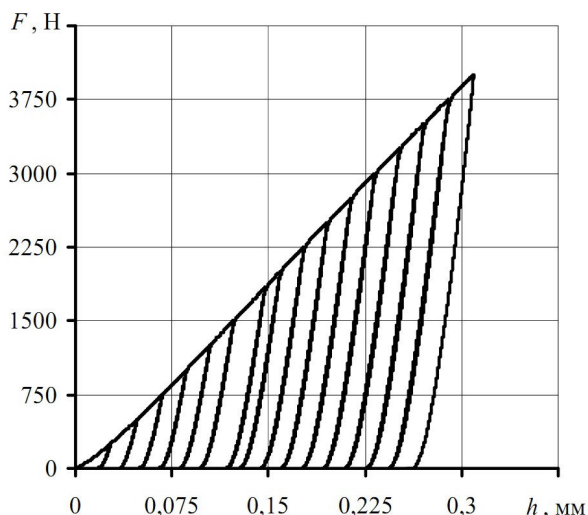


Рисунок 3. Характерна діаграма інструментованого індуентування сталі 17Г1С–У за циклічного навантаження

Figure 3. Typical diagram of the instrumented indentation of steel 17G1S-U under cyclic loading

Результати експериментальних досліджень та їх обговорення

Результати дослідження впливу механічної обробки поверхні робочої ділянки зразків на механічні характеристики ОМ труби трубопроводу. Діаграми деформування плоских зразків з різною механічною обробкою робочих поверхонь приведено на рис. 4. Отримані діаграми були використані для визначення механічних властивостей, середні значення яких наведено в табл. 1.

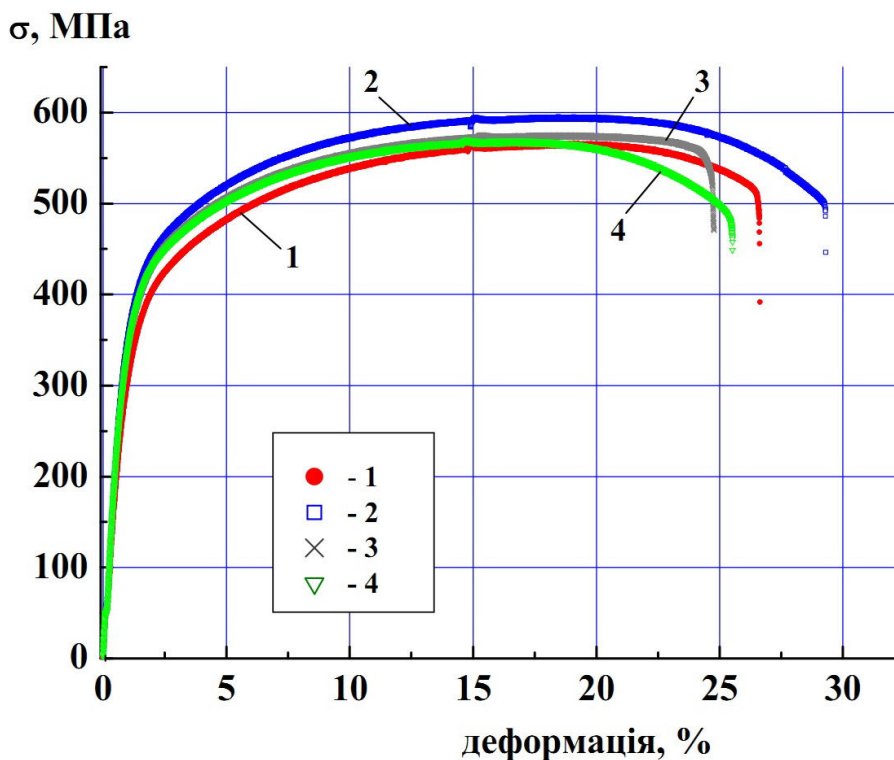


Рисунок 4. Діаграми деформування зразків з різною механічною обробкою робочих поверхонь:

1 – без обробки поверхонь; 2 – з обробкою зовнішньої та внутрішньої поверхонь; 3 – з обробкою тільки внутрішньої поверхні; 4 – з обробкою тільки зовнішньої поверхні

Figure 4. Stress-strain diagrams of specimens with different mechanical treatment of working surfaces: 1 – without surface treatment; 2 – with treatment of internal and external surfaces; 3 – with treatment of an internal surface only; 4 – with treatment of an external surface only

Таблиця 1. Залежність механічних властивостей сталі 17Г1С-У від механічної обробки поверхні зразків із труби Ø530x8 (зразки вирізані у поперечному напрямку труби)

Table 1. Dependence of the mechanical properties of steel 17G1S-U on the mechanical treatment of specimen surfaces from the pipe of 530x8 mm in diameter (specimens cut in the transverse direction of the pipe)

| Обробка поверхні | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ_{Σ} , % | $\delta_{рівн.}$, % | ψ , % |
|------------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------|
| Без обробки поверхонь | 567 | 331 | 25,6 | 19,5 | 39,2 |
| Оброблена зовнішня поверхня | 574 | 336 | 22,5 | 15,9 | 44,1 |
| Оброблена внутрішня поверхня | 581 | 355 | 21,9 | 17,5 | 36,3 |
| З обробкою обох поверхонь | 594 | 356 | 25,9 | 18,5 | 45,5 |

Тут σ_b – границя міцності; $\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості; δ_{Σ} – відносне видовження; $\delta_{рівн.}$ – відносне рівномірне видовження; ψ – відносне звуження.

Отримані результати показали, що механічна обробка обох поверхонь зразка труби після тривалої експлуатації на 4,8% підвищує границю міцності та 7,6% – умовну границю текучості і на 16% підвищує відносне звуження проти зразка з необробленою поверхнею. Слід відзначити, що механічна обробка зовнішньої або внутрішньої поверхні підвищує границю міцності тільки на 1,2%, в той час як двостороння механічна обробка – на 4,8% проти зразка з необробленою поверхнею. Діаграми деформування з односторонньою механічною обробкою розташовані між діаграмами з обробленими та необробленими обома поверхнями (рис. 4).

Результати дослідження впливу форми зразка та напрямку прокату на механічні характеристики ОМ та металу зварного з'єднання. Вплив форми лабораторного зразка та напрямку його осі відносно осі трубопроводу на механічні характеристики матеріалу труби досліджували на плоских зразках із ОМ та зразках зі зварним з'єднанням з механічною обробкою та без обробки його зовнішньої та внутрішньої поверхонь та на повномірних циліндричних зразках (див. рис. 1). У таблиці 2 наведено середні значення механічних характеристик залежно від форми зразка та напрямку його осі відносно осі трубопроводу.

Таблиця 2. Середні значення механічних характеристик металу вздовж і поперек труби

Table 2. Average values of the mechanical properties of the metal along and across the pipe

| Тип зразка | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ_{Σ} , % | $\delta_{рівн.}$, % | ψ , % |
|---|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------|
| Поперек труби | | | | | |
| Плоскі зразки, ОМ (без обробки поверхні) | 556 | 407 | 25,9 | 15,4 | 43,1 |

| | | | | | |
|---|-----|-----|------|------|------|
| Плоскі зразки, ОМ (з обробкою поверхні) | 597 | 420 | 24,3 | 16,7 | 45,7 |
| Циліндричні зразки, ОМ | 595 | 408 | 30,0 | 21,6 | 53,1 |
| Плоскі зразки, зварне з'єднання (без обробки поверхні шва) | 569 | 341 | 18,0 | 11,5 | 39,4 |
| Плоскі зразки, зварне з'єднання (з обробкою поверхні шва) | 591 | 421 | 20,3 | 13,8 | 37,4 |
| Вздовж труби | | | | | |
| Плоскі зразки, ОМ (без обробки поверхні) | 561 | 411 | 33,5 | 19,5 | 65,1 |
| Плоскі зразки, ОМ (з обробкою поверхні) | 604 | 432 | 32,7 | 19,5 | 62,1 |
| Циліндр. зразки, ОМ | 598 | 391 | 31,7 | 18,8 | 69,7 |
| Циліндр. зразки, МШ | 599 | 402 | 26,4 | 16,4 | 58,4 |

Слід відзначити, що зразки, вирізані поперек труби (S–T), зі зварним з'єднанням без обробки поверхні (без зняття підсилення шва) руйнувалися по ОМ на відстані приблизно 5 мм від краю зварного шва (рис. 5). При цьому поблизу місця руйнування характерно значне формування мікропор.

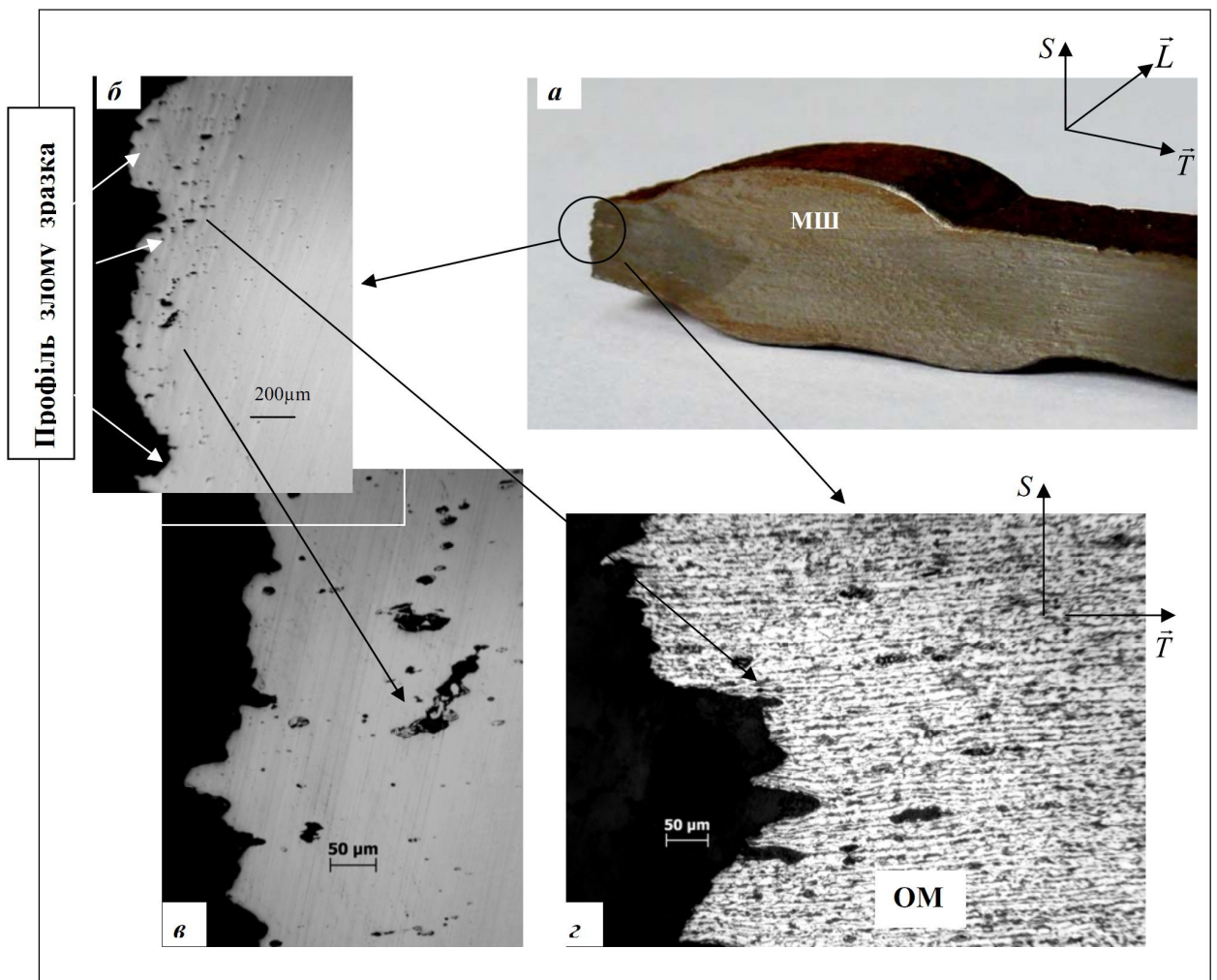


Рисунок 5. Частина зруйнованого зразка зі зварним з'єднанням (без зняття підсилення шва) труби магістрального трубопроводу з поздовжнім зварним швом після випробувань на розтяг:

a – загальний вигляд; *b, в* – формування мікропор поблизу місця руйнування (полірована поверхня в перетині (*S-T*) без травлення на мікроструктуру); *г* – мікроструктура ОМ труби поблизу місця руйнування в перетині (*S-T*)

Figure 5. A part of the failed specimen with a welded joint (without removal of the weld reinforcement) of the main pipe with a longitudinal welded joint after tensile tests:

a - a general view; *b, c* - formation of micropores in the vicinity of the fracture site (a polished surface at the intersection (*S-T*) without microstructure etching), *d* - microstructure of the pipe BM in the vicinity of the fracture site at the intersection (*S-T*)

Зразки, вирізані поперек труби (*S-T*), зі зварним з'єднанням з обробкою поверхні (зі знаттям підсилення шва) руйнувалися майже посередині його робочої частини по МШ (рис. 6). При цьому поблизу місця руйнування спостерігали незначне формування мікропор.

Зразки із ОМ у поперечному і поздовжньому напрямку труби та зразки із МШ у поздовжньому напрямку руйнувалися посередині робочої частини зразка.

Аналіз експериментальних даних (табл. 2) показує, що випробування на розтяг зразків з обробленою поверхнею (плоскі та циліндричні зразки, рис. 1*а, г*) із ОМ та МШ, дають завищену на 6,3–7,6% границю міцності відносно аналогічних даних, отриманих на плоских зразках із ОМ без обробки поверхні (рис. 1*б*) незалежно від напрямку прокату. Границя міцності ОМ та МШ за результатами випробування зразків з обробленою поверхнею майже не залежить від форми зразка (циліндричний чи плоский) і напрямку прокату (вздовж чи поперек труби). Максимальна похибка складає 1,5%.

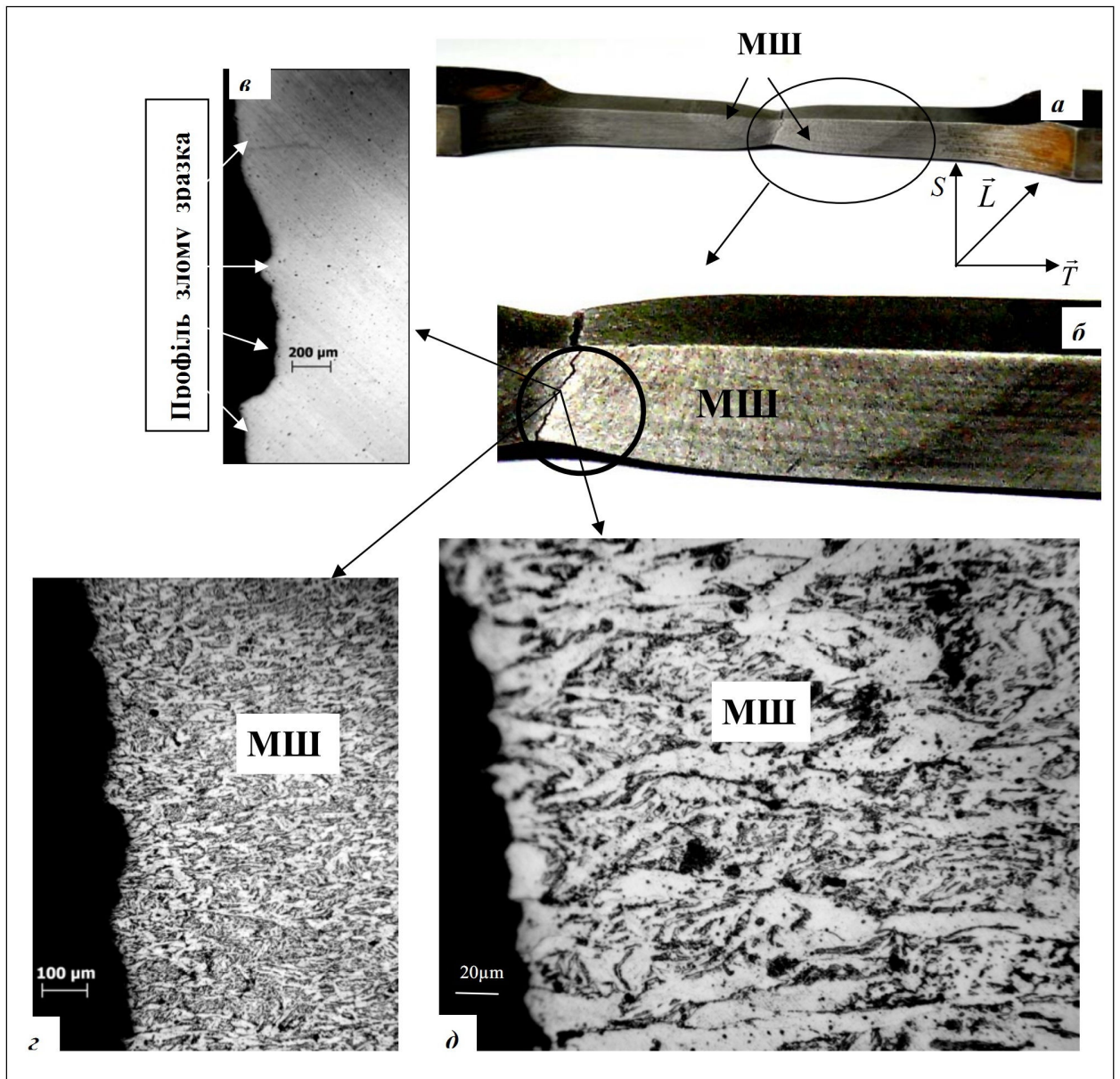


Рисунок 6. Частина зруйнованого зразка зі зварним з'єднанням (зі зняттям підсилення шва) труби магістрального трубопроводу з поздовжнім зварним швом після випробувань на розтяг: *a, б* – загальний вигляд; *в* – формування мікропор поблизу місця руйнування (полірована поверхня в перетині $(S-T)$ без травлення на мікроструктуру); *г, д* – мікроструктура МШ поблизу місця руйнування в перетині $(S-T)$

Figure 6. A part of the failed specimen with a welded joint (with the removal of the weld reinforcement) of the main pipe with a longitudinal weld after tensile testing: *a, b* – a general view; *c* – formation of micropores near the site of fracture (a polished surface at the intersection $(S-T)$ without the microstructure etching); *d, f* – WM microstructure in the vicinity of the fracture site at the intersection $(S-T)$.

Водночас умовна границя текучості значно залежить від форми зразка та напрямку прокату. У поздовжньому напрямку труби значення умовної границі текучості, отримані при випробуваннях циліндричних зразків із МШ та ОМ (рис. 1г), на 2,25–4,9% нижчі відносно аналогічних даних, отриманих на плоских зразках із ОМ без обробки поверхні (рис. 1б). Умовна границя текучості, визначена на плоских зразках із ОМ та МШ з обробленою поверхнею (рис. 1а), на 3,1–5,1% вища за дані, отримані на плоских зразках із ОМ без обробки поверхні (рис. 1б) незалежно від напрямку прокату. Границі міцності

та умовної границі текучості визначені на циліндричних зразках (рис. 1з) із ОМ трубопроводу занижені на 1% та 9,5% у поздовжньому напрямку труби та на 0,25 % та 2,65% – у поперечному напрямку відповідно проти даних, отриманих на плоских зразках (рис. 1а) з обробленою поверхнею.

Характеристики пластичності суттєво залежать від форми зразка та напрямку прокату. У поздовжньому напрямку труби відносні видовження δ , отримані при випробуваннях циліндричних (рис. 1з), та плоских зразків з обробленою поверхнею (рис. 1а) із ОМ на 5,5% та 2,2% нижчі, відповідно, відносно даних отриманих при випробуваннях плоских зразків із ОМ без обробки поверхні (рис. 1б). Відносне звуження ψ істотніше залежить від форми зразка. Для циліндричного зразка із ОМ відносне звуження на 7,1 % вище, а для плоского зразка з обробленою поверхнею на 4,5% нижче відносно даних, отриманих при випробуванні плоских зразків без обробки поверхні. Для МШ відносне видовження та відносне звуження, отримані при випробуванні циліндричних зразків на 21,2% та 10,2% відповідно менші відносно аналогічних даних, отриманих при випробуванні плоских зразків без обробки поверхні.

У поперечному напрямку труби відносне видовження циліндричних зразків із ОМ на 16% більше, а для плоских зразків з обробленою поверхнею на 6,3% менше відповідних значень, отриманих на плоских зразках без обробки поверхні. Відносне звуження, отримане на циліндричних та плоских зразках з обробленою поверхнею із ОМ, на 23,0% та 6,0% більші відповідних даних, отриманих на плоских зразках без обробки поверхні. Для МШ відносне видовження та відносне звуження, отримані на плоских зразках з обробленою поверхнею, на 22,6% та 13,25% нижчі відповідних даних, отриманих при випробуванні плоских зразків без обробки поверхні. Анізотропія характеристик пластичності у поздовжньому та поперечному напрямках труби більше проявляється на плоских зразках.

Результати визначення механічних характеристик ділянок зварного з'єднання. У даній роботі шляхом випробувань циліндричних зразків із укороченою робочою частиною (рис. 1д), які вирізані у поперечному напрямку труби трубопроводу, були отримані характеристики механічних властивостей окремих ділянок зварного з'єднання та ОМ (табл. 3).

Таблиця 3. Механічні властивості характерних ділянок зварного з'єднання

Table 3. Mechanical properties of specific areas of the welded joint

| Зона зварного з'єднання | σ_b , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ_{Σ} , % | $\delta_{рівн.}$, % | ψ , % |
|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|------------|
| ОМ | 628 | 420 | 29,7 | 17,1 | 47,0 |
| ЗТВ | 645 | 417 | 28,3 | 14,4 | 38,2 |
| МШ | 651 | 438 | 26,5 | 16,8 | 50,0 |

Слід відзначити, що отримані при випробуваннях вирізаних у поперечному напрямку труби циліндричних зразках із укороченою робочою частиною завищують на 5,46% та 2,86% границю міцності й умовну границю текучості ОМ та занижують на 11,42% відносне звуження проти відповідних характеристик, отриманих на повномірних

циліндричних зразках. Для МШ дані, отримані при випробуванні вирізаних у поперечному напрямку труби циліндричних зразків із укороченою робочою частиною, дають завищену на 8,7% та 9,05% границю міцності й умовну границю текучості та занижене на 14,42% відносно звуження проти відповідних даних, отриманих при випробуванні повномірних циліндричних зразків вирізаних у повздовжньому напрямку труби.

Результати визначення механічних характеристик ділянок зварного з'єднання методом інструментованого індентування. На рис. 7 представлено границю міцності та умовну границю текучості для характерних ділянок зварного з'єднання визначені методом інструментованого індентування по поперечному перерізу (4) та по зовнішній (5) обробленій поверхні труби трубопроводу. На графіки нанесені також межі розкиду границі міцності та умовної границі текучості для сталі 17Г1С-У згідно з ТУ 14-3-1270-2001 ($\sigma_b = 510,0 - 630,0 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 360,0 - 460,0 \text{ МПа}$), а також дані, отримані на плоских (1, 6) і циліндричних повномірних (2, 7) та з укороченою робочою частиною (3) зразках, вирізаних поперек і вздовж труби. Слід відзначити, що характеристики міцності матеріалу труби, отримані методом інструментованого індентування вздовж поперечного перерізу, краще узгоджуються з даними механічних випробувань плоских зразків з обробленою поверхнею у поперечному напрямку труби. Максимальна різниця границі міцності, визначеної методом інструментованого індентування та механічними випробуваннями на розтяг не перевищує 4,8%, а умовної границі текучості – 6%. Обидві характеристики міцності визначені методом інструментованого індентування по зовнішній обробленій поверхні труби вищі відносно аналогічних даних, отриманих при випробуваннях на розтяг.

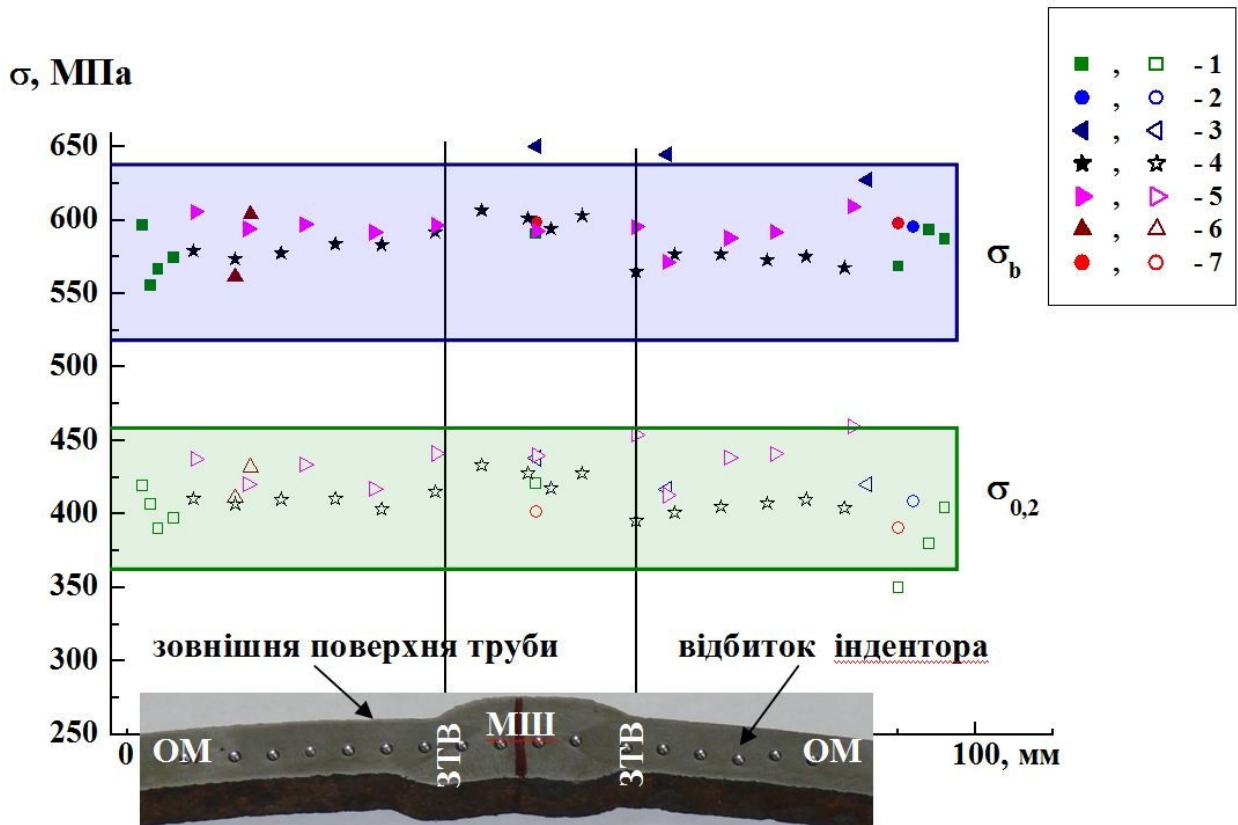


Рисунок 7. Розподіл границі міцності (σ_b , темні точки) та умовної границі текучості ($\sigma_{0,2}$, світлі точки) уздовж зразка зі зварним з'єднанням визначені: методом інструментованого індентування по поперечному перерізу труби (4) та по зовнішній поверхні (5); механічними випробуваннями плоских (1) та циліндричних повномірних (2) та вкорочених (3) зразків поперек труби; механічними випробуваннями плоских (6) та циліндричних повномірних (7) зразків уздовж труби. На світлинці ділянки зварного з'єднання (поперечного перерізу труби) видно відбитки індентора інструментованого індентування

Figure 7. The ultimate strength, σ_u , (solid points) and the offset yield stress, $\sigma_{0,2}$, (open points) distribution along the specimen with a welded joint are determined by: the instrumented indentation technique in the transverse cross-section of the pipe (4) and on the external surface (5); the mechanical testing of flat (1), cylindrical full-sized (2) and shortened (3) specimens across the pipe; the mechanical testing of flat (6) and cylindrical full-sized (7) specimens along the pipe. The indenter imprints obtained using the instrumented indentation technique are seen in the image of the welded joint area (cross-section of the pipe)

Висновки. При використанні літературних даних механічних властивостей металу конструкції у вихідному стані (без експлуатаційних пошкоджень), які отримані в основному на циліндричних або плоских зразках з обробленою поверхнею, необхідно враховувати, що ці дані можуть мати завищені або занижені значення відносно аналогічних характеристик металу конструкції після тривалої експлуатації (з експлуатаційними пошкодженнями) без механічної обробки поверхні зразка. Значення механічних властивостей металу трубопроводу залежить від форми зразка та напрямку прокату.

Анізотропія характеристик пластичності у поздовжньому та поперечному напрямках труби більше проявляється на плоских зразках.

Зразки зі зварним з'єднанням без зняття підсилення шва руйнуються по ОМ з утворенням великої кількості пор, а зразки зі зняттям підсилення зварного шва – по МШ із незначним утворенням пор.

Характеристики міцності матеріалу труби, отримані неруйнівним методом інструментованого індентування, добре узгоджуються з даними механічних випробувань плоских зразків з обробленою поверхнею у поперечному напрямку труби. Максимальна різниця значень границі міцності, визначеної методом індентування та механічними випробуваннями на розтяг, складає 4,8%, а умовної границі текучості – 6%.

Загалом експериментально отримані характеристики механічних властивостей металу трубопроводу після тривалої експлуатації знаходяться в межах розкиду значень границі міцності та умовної границі текучості сталі 17Г1С-У згідно з ТУ 14-3-1270-2001.

Conclusions. When using literature data on the mechanical properties of the structural metal in the initial state (without in-service damages) obtained mainly for cylindrical or flat specimens with surface treatment, it is necessary to take into account that these data can have overestimated or underestimated values as compared to the same characteristics of the structural metal after a long-term operation (having in-service damages) without surface treatment of the specimen. The values of the mechanical properties of the pipeline metal are dependent on the specimen shape and direction of rolling.

The anisotropy of the plasticity characteristics in the longitudinal and transverse directions of the pipe becomes more pronounced in flat specimens.

The specimens with welded joints (without removal of the weld reinforcement) fail along the BM, forming a large number of pores, whereas the specimens with removal of the weld reinforcement fail along the WM with a slight formation of pores.

The strength characteristics of the pipe material obtained by nondestructive instrumented indentation are in good agreement with the data on the mechanical testing of flat specimens with surface treatment in the transverse direction of the pipe. The maximum difference in the values of the ultimate strength, determined by the indentation and mechanical tensile tests, is 4.8%, and that in the offset yield stress is 6%.

In general, the experimentally obtained characteristics of the mechanical properties of the pipeline metal after long-term operation are within the scatter of values of the ultimate strength and offset yield stress for steel 17G1S-U in accordance with Specifications 14-3-1270-2001.

Роботу виконано за сприяння цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України "Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин" ("РЕСУРС"), проекти Р6.7.1 та Р6.7.2.

Список використаної літератури

1. Труфяков, В.И. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках [Текст] / В.И. Труфяков. – К.: Наукова думка, 1990. –768 с.
2. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). Металлы. Методы испытаний на растяжение.
3. API Spec 5L – Specification for Line Pipe. American Petroleum Institute.
4. ISO 14577-1:2002. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method.
5. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования [Текст] / В.В. Харченко, Н.П. Рудницкий, О.А. Каток, А.Н. Неговский, А.В. Дроздов, В.В. Кутняк // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 27. – С. 140 – 147.
6. Патент на корисну модель № 57446 Україна, МПК (2011.01) G 01 N3/40. Установка для реєстрації діаграми інструментованого індентування / В.В. Харченко, О.А. Каток, М.П. Рудницький, В.В. Кутняк, О.В. Дроздов, О.М. Неговський // Чинний з 25.02.2011. Бюл. № 4.
7. Haggag, F.M. Innovative SSM Technology Determines Structural Integrity of Metallic Structures: Example Applications for Pressure Vessels and Oil and Gas Pipelines / F. M. Haggag // International Journal of Pure and Applied Physics. – 2007. № 1. – P. 91–108.
8. Марченко, В.В. Оцінка характеристик міцності сталей методом інструментованого індентування [Текст] / В.В. Харченко, О.А. Каток, В.Е. Філатов // Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи їх діагностування і прогнозування: міжн. науково-технічна конференція, 21–24 вересня 2009 р.: праці конференції / Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя. – Тернопіль, 2009. – С.64–69.

Отримано 02.03.2012