

5. L.M. Akselrod, A.P. Laptev, V.A. Ustynov, and Yu.D. Herashchuk, «Povishenye stoikosty futerovky konverterov: ohneupori, tekhnolohicheskiye pryemi» [«Increasing the durability of converter linings: refractories, technological methods»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 1-2, pp. 9-15, 2009. (Rus.)
6. V.O. Sinelnikov, and D. Kalisz, «Modeling viscosity of converter slag», *Archives of foundry engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 119-124, 2015.
7. P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko, and V.O. Sinelnikov, *Influence of different factors and physical impacts on the power of flowing supersonic jet during slag spraying in the converter. New developments in mining engineering*. London: Taylor & Francis Group, A Balkema Book Publ., 2015.
8. E.V. Protopopov, R.F. Kalimullin, A.G. Chernyatevich, P.S. Kharlashin, and N.A. Chernysheva, «Supersonic Jets Injected into Converter Slag», *Steel in Translation*, vol. 42, no. 10, pp. 711-715, 2012. doi: 10.3103/s0967091212100142.
9. P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko, E.V. Protopopov, and S. Feyler, «Adding slag to a supersonic jet in an oxygen converter», *Steel in Translation*, vol. 45, no. 2, pp. 100-104, 2014. doi: 10.3103/s0967091215020084.
10. V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, P.L. Žak, and R.D. Kuzemko, «Power Increase of Supersonic Jets in Oxygen Converter», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 461, pp. 1-6, 2018. doi: 10.1088/1757-899x/461/1/012078.

Рецензент: В.О. Маслов,
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.02.2023

Стаття прийнята 02.04.2023

УДК 621.774.2

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300060

© Григоренко В.У.¹, Овсяников В.В.²

РОЗВИТОК МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМУВАННЯ І ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ МЕТАЛУ У ВИРОБНИЦТВІ ПРЯМОШОВНИХ ТРУБ ВЕЛИКИХ ДІАМЕТРІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСПАНДУВАННЯ

З 2020 року в Україні ТОВ НВП «УКРТРУБОІЗОЛ» почало експлуатувати технологічну лінію виробництва труб великого діаметру (ТВД) для магістральних нафто- і газопроводів з гідромеханічним експандером. З 2023 року в Україні припинили дію міждержавні стандарти ГОСТ 20295-85 та ГОСТ 10706-76. Постановка проблеми. Потрібні українські стандарти. Потрібно визначення раціональних значень деформації та ефективності експандування зі зниження залишкових напружень в метали труб. Ціль. Розробка українських стандартів з виробництва ТВД та визначення впливу експандування на залишкові напруження. Методика. Застосований метод розрізання кілець. Результати. Розроблено та введено в дію за участю автора – ДСТУ 9219:2023; ДСТУ 9218:2023 та ТУ 24.2-05757883-095:2022. Досліджені труби діаметром 630 мм, зі стінкою 8 мм, зі сталі S335 та з гарячекатаного рулонного листа. Розкриття між повздовжніми кромками трубної заготовки після гібки становило 70-80 мм. Для кільця після зварки розкриття складо 180 мм, а для кілець експандованих на 0,8 %, 1,2 % та 0,4 % -58-53 мм. Це вказує на те, що залишкові напруження

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1809-2842

² аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8458-176X, vitaliy.ovsyaniuk29@gmail.com

після експандування були значно меншими ніж у трубі після зварки шва, а величина зміни експандування від 0,4% до 1,2% не дає впливу на залишкові напруження. Наукова новизна. Вперше для JCOE-технології виробництва ТВД з рулонного гарячекатаного листа визначили експериментально вплив експандування на залишкові напруження. Показано, що розкриття кілець при експандуванні суттєво зменшуються. Вперше для JCOE-технології виробництва ТВД визначили вплив величини експандування на зниження залишкових напружень. Показано, що деформації 0,4-1,2% дають однакове розкриття кілець після експандування. Практична значимість. Отримані результати можуть бути корисними для персоналу підприємств з виробництва сталевих зварних ТВД та проектних організацій при проектуванні нафтогазопроводів.

Ключові слова: зварні труби великого діаметру, формування, зварювання, експандування, залишкові напруження, деформації.

V.U. Hryhorenko, V.V. Ovsianykov. Development of the method for determining the deformation parameters and residual stresses of metal in the manufacture of straight-seamed pipes of large diameter using expansion. Since 2020, in Ukraine, LLC NVP «UKRTRUBOIZOL» began to operate a technological line for the production of large-diameter pipes (TVD) for main oil and gas pipelines with a hydromechanical expander. From 2023, interstate GOST 20295-85 and GOST 10706-76 ceased to be valid in Ukraine. Formulation of the problem. Ukrainian standards are needed. It is necessary to determine the rational values of the deformations and the effectiveness of the expansion to reduce the residual stresses in the metal of the pipes. Goal. Development of Ukrainian standards for TVD production and determination of the effect of expansion on residual stresses. Method. The method of cutting rings was used. The results. Developed and implemented with the participation of author: DSTU 9219:2023; DSTU 9218:2023 and TU 24.2-05757883-095:2022. Pipes with a diameter of 630 mm, with a wall of 8 mm, made of S335 steel and hot-rolled rolled sheet were studied. The opening between the longitudinal edges of the pipe blank after bending was 70-80 mm. For the ring after welding, the opening was 180 mm and for the rings expanded by 0.8%, 1.2% and 0.4% -58-53 mm. This indicates that the residual expansion stresses were much smaller than in the pipe after welding the seam, and the amount of expansion change from 0.4% to 1.2% does not affect the residual stresses. Scientific novelty. For the first time, for the JCOE technology of production of TVD from rolled hot-rolled sheet, the influence of expansion on residual stresses was determined experimentally. It was shown that the opening of the rings during expansion is significantly reduced. For the first time, the influence of the amount of expansion on the reduction of residual stresses was determined for the JCOE technology of TVD production. It is shown that deformations of 0.4-1.2% give the same opening of the rings after expansion. Practical significance. The obtained results can be useful for the personnel of steel welded TVD production enterprises and project organizations in the design of oil and gas pipelines.

Key words: large-diameter welded pipes, forming, welding, expansion, residual stresses, deformations.

Постановка проблеми. З 2014 року перестав працювати Харцизький трубний завод. Виробничі потужності цього заводу забезпечували можливість виробляти більше 600000 тон зварних прямошовних труб великого діаметра у рік.

У 2019-2020 рр. труби великого діаметра в Україні у числі інших підприємств почало виробляти підприємство «УКРТРУБОІЗОЛ». На цьому заводі працює з 2020 р. нова сучасна лінія (JCOE-процес). Ця лінія дозволяє виробляти труби з зовнішнім діаметром 406,4-1422 мм. Технологія виробництва має повний сучасний цикл виробництва труб великого діаметру для магістральних нафто- і газопроводів включно з гідромеханічним експандером [1].

Лінія включає [2]:

- Пресове покрокове деформування;

- Диформовку повздовжніх кромки на диформовочній машині;
- Зборку труби з застосування суцільного технологічного зварного шва по всій довжині труби;
- Багатодугове зварювання повздовжніх робочих швів під шаром флюсу з зовнішньої та з внутрішньої поверхні труб з повним перекриттям технологічного шва;
- Калібрування діаметра з одночасним експандуванням покровоко вздовж всієї труби на гідромеханічному експандері (рис 1, та рис 2).



Рис. 1 – Загальний вигляд експандера

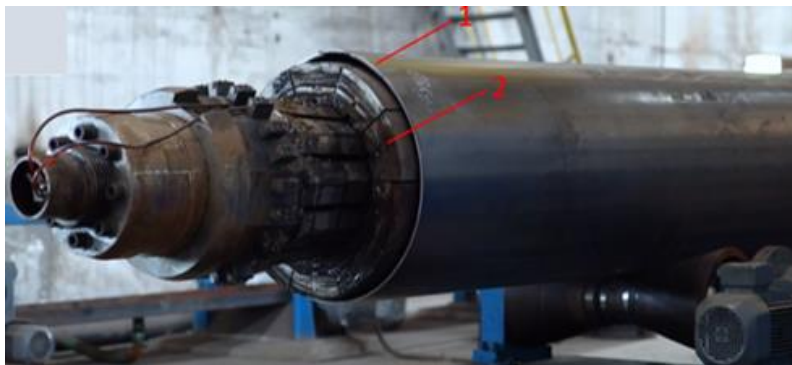


Рис. 2 – Передній кінець труби та головка експандера: 1 – передній кінець труби; 2 – робочий інструмент голови експандера

З 01.07.2023 на території України припинили свою дію міждержавні стандарти ГОСТ 20295-85 та ГОСТ 10706-76 і відповідно з'явилась потреба у розробці українських стандартів та технічних умов, де чітко повинні були вказані параметри деформування в експандері. Наявність експандування поставила питання раціональних значень деформацій збільшення діаметру звареної труби. З'явилися також питання з ефективності експандування з точки зору зниження залишкових напружень в металі труб.

У пункті 8.9 ДСТУ ISO 3183:2017 і API Spec 5L зазначено, що якщо труба не піддається подальшій нормалізації, загартуванню та відпуску або подальшій термообробці, або подальшому зняттю напружень, то для зняття напружень має бути проведено експандування. При цьому відносне збільшення діаметра труби (коефіцієнт s_r) повинно бути в межах від 0,003 до 0,015 [2].

У додатковій специфікації IOGP S-616 версія 2.0 від 2022 р. до API Spec 5L та ISO 3183 за програмою спільного промислового проекту 33 (JP 33) організовано стандартизацію специфікацій обладнання для закупівель IOGP за підтримки Всесвітнього економічного форуму (WEF) та надано роз'яснення до п. 8.9 API Spec 5L та ISO 3183 до труб типу SAWL – Труба з одним або двома поздовжніми швами, що отримані способом дугового зварювання під флюсом:

- «Неекспандовані труби SAWL повинні мати термічну обробку всього корпусу».

А у Специфікації IOGP S-616 версія 1.0 від 2019 р. у примітці до пункту 8.9.2 API Spec 5L відмічене:

- «Холодне розширення від 0,8 % до 1,2 % виявилось ефективним для контролю розмірів і круглості труб допусків на розміри та округлість труб, а також для мінімізації залишкових напружень, що виникають при формуванні та зварюванні труб».

Але стоїть задача визначення експериментально співвідношень і величин залишкових напружень в металі труби після формовки листа в трубу, після зварки шва та після експандування.

Потрібно також визначили вплив значення деформацій зі збільшення діаметру звареної труби при експандуванні на зменшення залишкових напружень опесередковано при експандуванні.

Таким чином потрібно вирішувати проблеми зі створення нових українських ДСТУ та технічних умов (ТУ) для забезпечення відповідності іноземним стандартам та з визначення експериментально співвідношень та величин залишкових напружень після формовки листа в трубу (після зварки шва та експандування).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електрозварні труби великих діаметрів в Україні в основному виробляли та виробляють за наступними стандартами:

1. ДСТУ ISO 3183:2017 «Нафтова та газова промисловість. Труби сталеві для трубопроводних транспортних систем»;
2. API Specification 5L «Line Pipe, Forty-Sixth Edition»;
3. СНиП 2.05.06-85. «Магістральні трубопроводи»;
4. ДСТУ EN 10217-5:2015 (EN 10217-5:2002, IDT) «Труби сталеві зварні для роботи під тиском. Технічні умови постачання. Частина 5. Труби, зварені дуговим зварюванням під флюсом, з нелегованих і легованих сталей зі спеціальними властивостями для підвищеної температури»;
5. ГОСТ 20295-85 «Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия»;
6. ГОСТ 10706-76 (СТ СЭВ 489-77) «Трубы стальные электросварные прямошовные. Технические требования».

В зв'язку з тим, що з 01.07.2023 на території України припинили свою дію міждержавні стандарти ГОСТ 20295-85 та ГОСТ 10706-76 постала потреба у вітчизняних стандартах.

Належна безпека експлуатації магістральних газо- та нафтопроводів повинна будуватись на знаннях з рівня механічних властивостей та залишкових напружень у металі труб, що виробляють по різним технологіям.

Відомо, що на основі розрахунків залишкови напруження в тілі труби після пресового покрового J-формування склали близько 0,3-0,4 від межі плинності, а експериментальні дані, виконані за методикою з дифрактометричним методом, показали ефективність експандування – значення залишкових напружень після експандування становили близько 0,1 межі плинності [3].

В роботі [3] вказується на особливість покрового розширення периметра труби на гідромеханічному експандері – зварний шов розташовують у спеціальній виїмці на одному з клинів оправки експандера (рис. 3). При цьому на шов не діють радіальні напруження від роздачі труби. А шов має збільшення товщини («посилення») по зрівнянню з товщиною стінки труби в 1,3 рази.



Рис. 3 – Робочий інструмент з повздовжнім пазом для розташування зварного шва:
1 – повздовжній паз (ширина 45 мм, глибина 5 мм)

В роботі [4] відмічено, що незалежно від того, наскільки б складною не була термомеханічна історія прокатки, формування, шліфування, зварювання і т.д., що може мати місце для створення напруженого стану, залишкові напруження, що залишилися після цієї складної обробки, будуть повністю пружними. Залишкові напруження в металі є пружними незалежно від історії деформування і інших технологічних операцій і меншими ніж межа текучості. Для вимірів залишкових напружень застосовують механічні чи дифракційні методи.

При формуванні по технології JCOE трубний переділ не має негативного впливу на механічні властивості металу (розтяг та ударний вигин). Розкид властивостей трубної заготовки, знижується при експандуванні [5].

У процесі експандування напруження перевищують межу текучості на 0,3-1,5%. В роботі [5] виявлено, що залишкові напруження у металі труби зменшуються. Відмічається також, що релаксація залишкових напружень в металі відбувається також і вздовж труби.

Огляд релаксації залишкових напружень, що виникають в результаті різних виробничих процесів, та їх вплив на втомну поведінку наведено в роботі [6].

Мета статті. В роботі відповідно з постановленою проблемою визначено задачі з висвітлення результатів праці з розробок українських стандартів та ТУ з виробництва зварних труб великих діаметрів для умов України та з розробок розвинутого методу експериментально-аналітичного методу визначення залишкових напружень у металі готових труб (після експандування).

Виклад основного матеріалу. У зв'язку з анулюванням стандартів СРСР на трубу продукцію, серед виробників та споживачів ТВД гостро постало питання у розробці власних національних Українських стандартів та технічних умов.

Технічним комітетом стандартизації ТК 8 «Труби сталеві і балони» та споживачами трубної продукції за участю співавтора статті Овсяникова В.В. було розроблено та введено у дію:

- ДСТУ 9219:2023 Труби сталеві зварні для магістральних газонафтопроводів. Технічні умови [7];
- ДСТУ 9218:2023 Труби сталеві зварні прямошовні. Технічні умови [8];
- ТУ У 24.2–05757883–095:2022 Труби сталеві зварні прямошовні для магістральних газонафтопроводів [9].

Є також потреба в забезпеченні регламентованих механічних властивостей та в зменшенні рівня залишкових напружень у металі труб.

Застосували метод розрізання кілець для визначення рівня залишкових напружень у металі труб.

Експеримент провели при виробництві труб діаметром 630 мм з периметром 1981-1982 мм та з товщиною стінки 8 мм. Сталь S335. Стан поставки AR – гарячекатаний. Межа міцності 529 Н/мм². Межа плинності 403 Н/мм².

Після формовки труби розкриття кромки було 70-80 мм. Після доформовки кромки та зварки повздовжніх кромки вирізали чотири кільця з труби. Після розрізання кільця № 1 по зварному шву розкриття було 180 мм.

Кільця № 2, № 3, № 4 проекспандували з різними величинами відносного розширення відповідно 0,8%, 1,2% та 0,4%. Їх теж розрізали вздовж повздовжньої вісі труби в місці зварного шва (рис. 4).

Розкриття кільця № 2 склало 56 мм, кільця № 3 – 53 мм, кільця № 4 – 58 мм (таблиця 1).

Таблиця 1

Результати дослідження впливу експандування

№	Зовнішній периметр після зварки, мм	Експандування, %	Зовнішній периметр після експандування, мм	Розкриття, мм
№ 1	1982	0	1982	180
№ 2	1982	0,8	1998	56
№ 3	1982	1,2	2004	53
№ 4	1982	1,2	1990	58

Отримані результати вказують на те, що розкриття у зварній трубі після її експандування були майже у тричі меншими, ніж у труб після зварки шва без експандування. Цей результат

вказує на ефективність експандування зварних труб з точки зору зниження залишкових напружень у трубі, що були після зварки шва.



Рис. 4 – Розрізані кільця № 1, № 2, № 3, № 4 від труби розміром 630x8,0 мм

На трубах з різними величинами відносного збільшення зовнішнього діаметра труби від 0,4% до 1,2% величина розкриття розрізаної повздовж шва труби була майже однакова і дорівнювала 58-53 мм. Це вказує на те, що величина експандування в цьому діапазоні майже не впливає на величину зниження залишкових напружень у трубі, що вже має зварний шов.

Результати досліджень дозволили для зменшення залишкових напружень в металі труб для теплових мереж пропонувати застосовувати ДСТУ 9219:2023 не тільки для заміни ГОСТ 20295-85, але й ще для труб по ГОСТ 10706-76 (на зміну діє ДСТУ 9218:2023) для магістральних тепломереж діаметром більш 426 мм застосовувати експандування замість термічної обробки.

Отримані результати дослідження були представлені ТОВ НВП «УКРТРУБОІЗОЛ» на VII Міжнародній спеціалізованій виставці «НАФТОГАЗЕКСПО - 2023» у м. Київ.

Висновки

Експандування суттєво впливає на зменшення залишкових напружень, що мають місце після формовки та зварки труби. Розкриття кромки після розрізання кілець зменшуються майже у три рази. Величина експандування в дослідженому (0,4%-1,2%) діапазоні майже не впливає на величину зниження залишкових напружень у трубі, що вже має зварний шов.

Результати є корисними для підприємств, що виробляють та експлуатують труби великих діаметрів, а також для установ-проектантів нафто- та газопроводів і в тому числі для теплових мереж.

Перелік використаних джерел:

1. Виробництво труб – НВП «УКРТРУБОІЗОЛ». URL: <https://uti.ua/virobnitstvo-trub/> (дата звернення: 15.05.2023).
2. Процес експандування в технологіях виробництва труб великого діаметра для магістральних нафто- і газопроводів та металознавчі аспекти його використання / Лоскутов О.Ю., Овсяников В.В., Проців В.В., Григоренко В.У. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2021. № 65. С. 99-106. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.099>.
3. Проців В.В., Григоренко В.У. Особливості процесу експандування в технологіях виробництва труб великого діаметра для магістральних нафто та газопроводів. *Метал та лиття України*. 2021. № 3(326). С. 64-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>.
4. Prevéy P., Hornbach D. Residual Stress in Pipelines. *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook* / edited by R. Winston Revie. John Wiley & Sons, Inc. P, 2015. Pp. 73-97. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119019213.ch07>.
5. Study on the residual stress relaxation in girth-welded steel pipes under bending load using

- diffraction methods / N. Hempela, J.R. Bunnb, T. Nitschke-Pagela, E.A. Payzantb, K. Dilger. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Volume 688. Pp. 289-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.005>.
6. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2007. Vol. 30. Iss. 3. Pp. 173-205. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x>.
 7. ДСТУ 9219:2023. Труби сталеві зварні для магістральних газонафтопроводів. Технічні умови. [Чинний від 2023-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2023. 23 с. URL: <http://katalog.uas.org.ua/poznach2.php?poznach=%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3+9219> (дата звернення: 10.08.2023).
 8. ДСТУ 9218:2023. Труби сталеві зварні прямошовні. Технічні умови. [Чинний від 2023-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2023. 17 с. URL: <http://katalog.uas.org.ua/poznach2.php?poznach=%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3+9218> (дата звернення: 10.08.2023).
 9. ТУ У 24.2-05757883-095:2022. Труби сталеві зварні прямошовні для магістральних газонафтопроводів. [Чинний від 2023-02-23]. Дніпро: ДП «НДТІ», 2023. 24 с.

References:

1. Vyrobnystvo trub – NVP «UKRTRUBOIZOL» (Production of pipes - NVP «UKRTRUBOIZOL») [Online]. Available: <https://uti.ua/virobnystvo-trub/>. Accessed on: May 15, 2023. (Ukr.)
2. O. Loskutov, V. Ovsyanikov, V. Protsiv, and V. Hryhorenko, «Protses ekspanduvannia v tekhnolohiiakh vyrobnystva trub velykoho diametra dlia mahistralnykh nafto- i hazoprovodiv ta metaloznavchi aspekty yoho vykorystannia» [«Process of expansion in production technologies of of large diameter pipes for main oil and gas pipelines and metal scientific aspects of its use»], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu – The Collection of Research Papers of the National Mining University*, № 65, pp. 99-106, 2021. doi: **10.33271/crpnmu/65.099**. (Ukr.)
3. V. Protsiv, and V. Hryhorenko, «Osoblyvosti ppotsecy ekspandyvnnia v texnolohiiakh vypobnystva tryb velykoho diametra dlia mahistralnykh nafto ta hazoprovodiv» [«Peculiarities of the expansion process in the production technology of large-diameter pipes for main oil and gas pipelines»], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, № 3(326), pp. 64-69, 2021. doi: **10.15407/steelcast2019.10.064**. (Ukr.)
4. P. Prevéy, and D. Hornbach, «Residual Stress in Pipelines», in *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook*, R. Winston Revie, John Wiley & Sons, Inc. P, 2015, pp. 73-97. doi: **10.1002/9781119019213.ch07**.
5. N. Hempela, J.R. Bunnb, T. Nitschke-Pagela, E.A. Payzantb, and K. Dilger, «Study on the residual stress relaxation in girth-welded steel pipes under bending load using diffraction methods», *Materials Science and Engineering: A*, vol. 688, pp. 289-300, 2017. doi: **10.1016/j.msea.2017.02.005**.
6. R.C. McClung, «A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue», *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 30, iss. 3, pp. 173-205, 2007. doi: **10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x**.
7. *Truby stalevi zvarni dlia mahistralnykh hazonaftoprovodiv. Tekhnichni umovy* [Welded steel pipes for main gas and oil pipelines. Specifications], State standart 9219:2023, 2023. Available: <http://katalog.uas.org.ua/poznach2.php?poznach=%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3+9219>. Accessed on: August 10, 2023. (Ukr.)
8. *Truby stalevi zvarni priamoshovni. Tekhnichni umovy* [Straight welded steel pipes. Specifications], State standart 9218:2023, 2023. Available: <http://katalog.uas.org.ua/poznach2.php?poznach=%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3+9218>. Accessed on: August 10, 2023. (Ukr.)
9. *Truby stalevi zvarni priamoshovni dlia mahistralnykh hazonaftoprovodiv* [Welded straight-seam steel pipes for main gas and oil pipelines], Specifications U 24.2-05757883-095:2022, 2023. (Ukr.)

Рецензент: С.Б. Каргін,
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.09.2023
Стаття прийнята 18.10.2023