

УДК. 656. 259. 2

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.42

## ВПЛИВ ЗБЕРЕЖЕНОЇ ЕНЕРГІЇ КОПРА НА ПОКАЗНИКИ ВИПРОБУВАННЯ ПАДАЮЧИМ ВАНТАЖЕМ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ

Лючков А. Д.<sup>1</sup>, Вахрушева В. С.<sup>2</sup>, Грузін Н. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Державне підприємство «Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади»

<sup>2</sup>Український державний університет науки і технологій (УДУНТ)  
ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

**Анотація.** Розглянуто методологічні питання, пов'язані з випробуваннями падаючим вантажем (ВПВ) листового прокату і труб із високов'язкої сталі для магістральних газопроводів високого тиску. Наголошено на недосконалому чинних стандартів щодо вибору значень збереженої енергії копра, що забезпечують коректне проведення випробувань металу. Уточнено межі застосування рекомендацій стандартів API RP5L3 і EN10274 за вибором величини збереженої енергії копра.

**Ключові слова:** випробування падаючим вантажем, збережена енергія копра, кількість в'язкого складника, поглинена енергія, зміцнення металу, високов'язка сталь.

### Вступ

З початком широкого застосування в будівництві магістральних газопроводів високого тиску труб, виготовлених із низьколегованих високов'язких сталей термомеханічної прокатки, виникла нова проблема. Було встановлено, що випробування падаючим вантажем (ВПВ) листового прокату і труб із таких сталей часто дають негативні результати за кількістю в'язкого складника в зламі, що є показником експлуатаційної надійності газопроводу.

Це явище в сучасній літературі пов'язують зі зміцненням металу зразків унаслідок пластичної деформації, що виникає внаслідок удару молота випробувального копра [1–3].

Що більша збережена енергія копра, то значніше зміцнення (див. рис. 1). На рис. 1 зображено результати попереднього оцінювання зміни твердості металу зразків ВПВ сталі Х80 завтовшки 27,7 мм у зоні пластичної деформації від удару бойка копра. Однак вплив зміцнення сталі на показники ВПВ вивчено недостатньо.

### Аналіз публікацій

Чутливість показників ВПВ високов'язких сталей до збереженої енергії копра проаналізовано в роботі [4]. Проведено порівняльні дослідження впливу енергії копра на температуру в'язко-крихкого переходу загартованої (QT) і термомеханічно обробленої (ТМО) сталі.

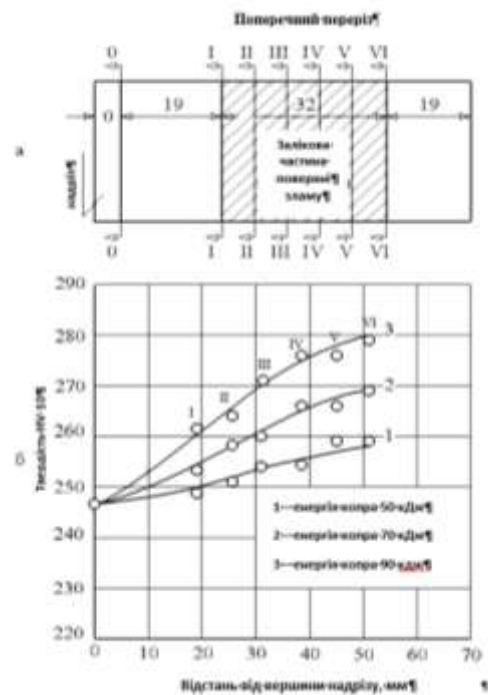


Рис. 1. Вплив збереженої енергії копра на зміцнення металу під час пластичної деформації від удару бойка. Сталь Х80 завтовшки 27,7 мм: а – схема розрізання зразків для вимірювання твердості; б – зміна твердості в площині поперечних перерізів I–VI за висотою поверхні зламу зразків

Як виявилось, в обидвох сталях спостерігається підвищення температури в'язко-крихкого переходу зі збільшенням збере-

женої енергії копра. Але, якщо зміна температури переходу сталі ТМО схильна до насичення, коли за умови збільшення енергії копра вища від певного рівня температура переходу стабілізується, то в QT сталі температура переходу підвищується безперервно. На думку дослідників, «цей результат дуже важливий, оскільки збережена енергія не регламентується в чинних стандартах на ВПВ [5–7]». Останнє не заперечує можливості значного спотворення результатів випробування.

З огляду на викладене вивчення можливості поліпшення результатів випробувань у процесі тестування ВПВ прокату трубних сталей, вироблених за технологією контрольованої (термо-механічної) прокатки, зокрема з прискореним охолодженням, є актуальним. *Wilkowski* із співавторами [3, 4] з інституту *Batelle* розробили рівняння з лінійною кореляцією між питомою ВПВ (DWTT) енергією зразків із стандартним пресованим надрізом і питомою енергією Шарпі-V (CVN) для звичайної гарячекатаної та нормалізованої сталі.

#### Мета й постановка завдання

Мета роботи полягає в оцінюванні впливу збереженої енергії копра на результати ВПВ за показниками кількості в'язкого складника в зламі та поглинутої енергії руйнування повнотовщинних зразків високов'язких трубних сталей з-поміж тих, що найбільш широко застосовуються в сучасному будівництві газопроводів високого тиску. На основі досліджень необхідно визначити рекомендації щодо вибору величини збереженої енергії копра ВПВ, які підвищують точність вимірювання та надійність оцінювання опору руйнування газопроводів.

#### Виклад основного матеріалу

##### Вплив збереженої енергії копра на показники випробування падаючим вантажем високов'язких трубних сталей

Для дослідження обрано високов'язкі ферито-бейнітні сталі термомеханічної прокатки, характеристики яких наведено в табл. 1. Випробування проводили на копрах *Zwick* із максимальною збереженою енергією 60 і 100 кДж відповідно до вимог стандарту API RP5L3. Досліджували стандартні зразки з пресованим надрізом, по два зразки на точку. У розрахунок брали середні значення з двох випробувань.

Таблиця 1 – Основні характеристики досліджуваних сталей

№ з/п	Товщина, мм	Категорія міцності	Повна поглинена енергія Шарпі-V, Дж
1	17,5	X80	304
2	27,7	X80	315
3	21,6	X70	250
4	25,8	X70	400
5	32,6	X70	360
6	39,0	X65	310

У роботі [8] розглянуто вплив величини збереженої енергії копра на результати випробування падаючим вантажем. Однак стандарти, що регламентують тестування ВПВ, не забезпечують можливість вибору значень збереженої енергії копра, оптимальних для сталі певного складу, товщини й показників в'язкості.

Рекомендації зарубіжних стандартів [5, 6] дають змогу лише обрати значення енергії, необхідної для повного руйнування зразків одним ударом копра. Вітчизняний стандарт [7] взагалі не містить будь-яких рекомендацій. Є лише вимога: «збереженої енергії копра має вистачити для повного руйнування зразка за один удар». У стандарті [5] вибір енергії копра здійснюється за допомогою графіків (рис. 2), побудованих за рівнянням *Wilkowski* для лінійного співвідношення поглинутої енергії Шарпі-V і енергії ВПВ [9]:

$$\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTT} = 3\left(\frac{E}{A}\right)_{\text{Шарпі-V}} + 63 \quad (1)$$

де  $E$  – повна поглинена енергія;

$A$  – площа руйнування;

$t$ , мм.

У стандарті [6] з тією самою метою рекомендується така формула для визначення необхідної збереженої енергії копра:

$$E_{REQ} = 5.6(KV) \frac{A_{DWTT}}{A_{KV}} \quad (2)$$

де  $A_{DWTT}$  – площа руйнування зразків ВПВ;

$A_{KV}$  – площа руйнування зразків Шарпі з гострим надрізом;

$KV$  – поглинена енергія зразків Шарпі з гострим надрізом.

У виразі (2) енергія Шарпі-V і повна енергія ВПВ також пов'язані лінійною за-

лежністю, яка добре описує поведінку прости́х гарячекатаних і нормалізованих вуглецевих і низьколегованих трубних сталей.

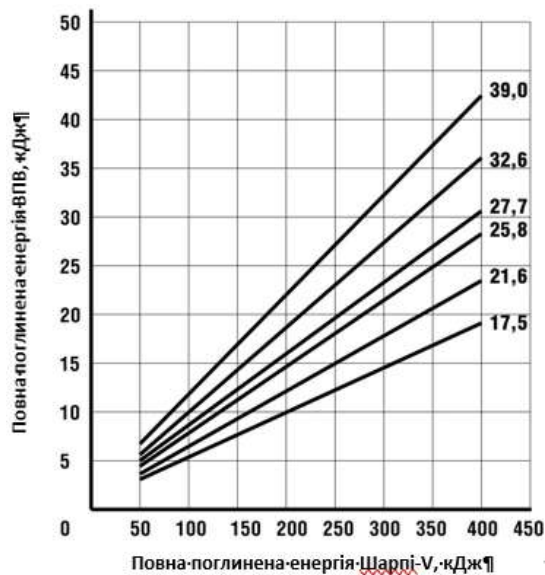


Рис. 2. Співвідношення DWTT і Шарпі-V, обчислене за лінійним рівнянням Wilkowski [9]

У реальному співвідношенні поглиненої енергії Шарпі та ВПВ високов'язких сталей має місце відхилення значень енергії ВПВ від лінійної залежності. Автори в роботі [10] досліджували сталь X100 завтовшки 16–20 мм. Було показано, що вже за KCV 150 Дж/см<sup>2</sup> відхилення енергії ВПВ від лінійного закону стає помітним, а за KCV 300–350 Дж/см<sup>2</sup> [6] – ще більшим. Видно, що за оптимальних значень збереженої енергії копра під час ВПВ високов'язких трубних сталей більшої товщини необхідні спеціальні випробування зі встановленням величини запасеної енергії, що забезпечує максимальні значення кількості в'язкого складника й повної поглинутої енергії ВПВ, аналогічні проведеним межах цієї роботи, зміцнення яких під час удару молота копра невелике й ще не призводить до помітного падіння показників ВПВ. У нашому дослідженні це сталі X80 і X70 завтовшки 17,5 і 21,6 мм відповідно. Для знаходження оптимальних значень збереженої енергії копра під час ВПВ високов'язких трубних сталей більшої товщини необхідні спеціальні випробування зі встановленням величини збереженої енергії, що забезпечує максимальні значення кількості в'язкого складника й повної поглинутої енергії ВПВ, аналогічні проведеним у цій роботі.

Випробування падаючим вантажем починали з максимальних значень збереженої енергії копра з подальшим її зниженням до значень, за яких припинялося повне руйнування зразків. Результати випробувань подано на рис. 3 і 4, де зображено графіки залежності кількості в'язкого складника та повної поглиненої енергії руйнування зразків ВПВ досліджених сталей.

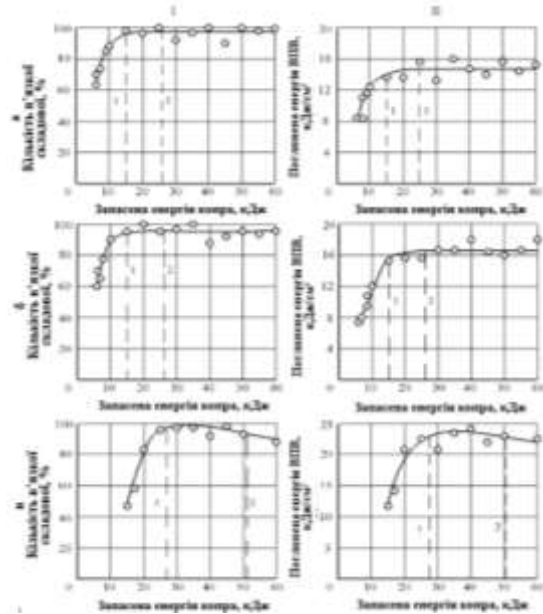


Рис. 3. Вплив збереженої енергії копра на кількість в'язкого складника (I) і повну поглинену енергію ВПВ (II): а – товстолістовий прокат X80 завтовшки 17,5 мм; б – товстолістовий прокат X70 завтовшки 21,6 мм; в – товстолістовий прокат X70 завтовшки 25,8 мм

Як видно, на всіх графіках спостерігаються ділянки різкого падіння поглинутої енергії, що слідує за ділянками, де кількість в'язкого складника та поглинута енергія або не залежать від енергії, що була запасена копром (як це має місце у випробуванні сталі X80 завтовшки 17,5 мм (рис. 3, а) та сталі X70 завтовшки 21,6 мм (рис. 3, б)), або їм передують ділянки, де фрактографічні та енергетичні показники ВПВ падають зі зростанням збереженої енергії. Це сталь X70 завтовшки 25,8 мм (рис. 3, в), сталь X80 завтовшки 27,7 мм (рис. 4, а), сталь X70 завтовшки 32,6 мм (рис. 4, б) і сталь X65 завтовшки 39,0 мм (рис. 4, в). Падіння показників ВПВ, унаслідок якого спостерігається припинення повного руйнування зразків, зумовлене зростанням дефіциту енергії, що підводиться, якої дедалі більше

не вистачає для забезпечення локальної пластичної деформації металу на фронті тріщини, яка зростає, і руйнування із в'язкого перетворюється на крихке, а потім і зовсім припиняється [12].

Падіння кількості в'язкого складника та поглинутої енергії за перегином на кривих, зображених на рис. 3, в і 4, безпосередньо пов'язане зі зміцненням металу під час пластичної деформації від удару молота копра, що стає достатнім для значного зниження обох показників ВПВ усіх досліджених сталей, починаючи з товщини 25,8 мм (рис. 3, в). У цьому разі положення максимумів на кривих (рис. 3, в і 4) визначає оптимальну величину збереженої енергії копра, що забезпечує досягнення найвищих значень як кількості в'язкого складника, так і поглиненої енергії.

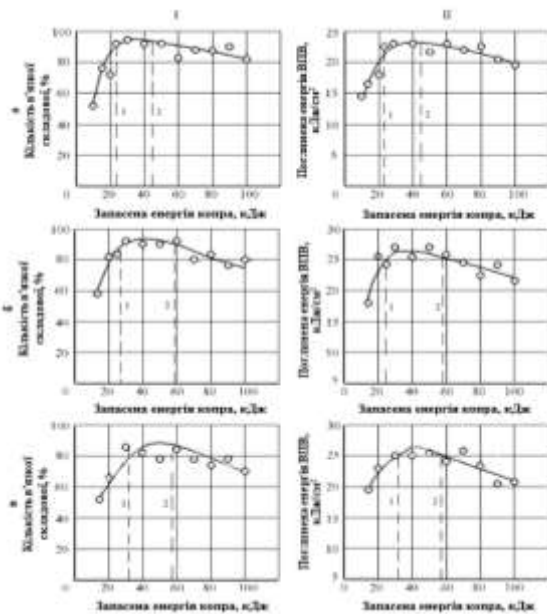


Рис. 4. Вплив збереженої енергії копра на кількість в'язкого складника (I) і повну поглинену енергію ВПВ (II): а – товстолистовий прокат X80 завтовшки 27,7 мм; б – товстолистовий прокат X70 завтовшки 32,6 мм; в – товстолистовий прокат X65 завтовшки 39,0 мм

На рис. 3 і 4 пунктирними лініями 1 і 2 показано значення збереженої енергії копра, що відповідають рекомендаціям стандартів [5], і відхилення значень енергії ВПВ може становити 200–300 Дж/см<sup>2</sup> або 20–30 %.

Відхилення від прямолінійності співвідношення поглинена енергія Шарпі-V і поглинена енергія ВПВ було також виявлено

під час дослідження сталі X70 завтовшки 18,3 мм [11]. Наведені показники свідчать про те, що за умови дотримання рекомендацій стандартів помилка, припущена під час вибору значення запасеної енергії копра, може істотно спотворити результати випробувань.

## Висновки

Наголошено на недосконалості нормативної бази оцінювання показників випробування падаючим вантажем високов'язких сталей для магістральних газопровідних труб.

Продемонстровано вплив величини збереженої енергії копра на зміцнення металу зразка під час удару молота в процесі випробування падаючим вантажем. Зі зростанням з збереженої енергії зміцнення металу збільшується.

Уточнено межі застосування рекомендацій стандартів API RP5L3 і EN10274 щодо вибору величини збереженої енергії копра в процесі випробування падаючим вантажем високов'язких трубних сталей. Рекомендації застосовні тільки для сталей завтовшки менше ніж 25 мм.

## Література

- Halsen K. O., Veritas D. N. Drop Weight Tear Testing of High Toughness Pipeline Material. *Proc. of IPC 2004 Int. Pipeline Conference*, October 4–8, 2004 Calgary, Alberta, Canada, p. 87–96.
- Hwang B., Lee S., Kim Y. M., Kim N. I. Analysis of Inverse Fracture Occurring in Hammer-Impacted Region during Drop-Weight Tear Test of a High-Toughness Linepipe Steel. *Proceedings of the thirteenth Int. Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, May 25–30, 2003.
- Wilkowski G., Shim D. J., Brust F. W., Rudland D., Duan D. Evaluation of Fracture Speed on Ductile Fracture Resistance. *Pipeline Technology Conference*, Ostende, Belgium, October 12–14, 2009.
- Вахрушева В. С., Грималовська Є. А. Особливості оцінки зламів зразків під час випробування падаючим вантажем сталі термомеханічної прокатки. *Металознавство та термічна обробка металів*. № 3, 2015, с. 11–15.
- API 5L3-2023. Труби магістральні. Рекомендований метод випробування на ударний розрив падаючим вантажем труб для магістральних трубопроводів.
- BS EN 10274:2009. Матеріали з металевими властивостями. Випробування падаючим вантажем.



7. ГОСТ 30456-2021. Металопродукція. Прокат листовий і труби сталеві. Методи випробування на ударний вигин.
8. Erdelen-Peppler M., Gehrman R., Junker G., Liessem A. Significance of Dwt Testing for Linerpipe Safety. *6th International Pipeline Conference IPC*, 2006. Calgary, Canada, September 2006.
9. Nick Osborne. Instrumented drop weight tear testing. *Advanced Materials and Processes*, Vol. 167, Issue 2, February 2009, p. 26–27.
10. Демюфонті Дж., Маннуччі Дж., Ді Б'яджо М., Фонзо А. Оцінка зупинки розповсюдження руйнування в сталевих трубах X100, отриманих за технологією ТМКО, для газопроводів високого тиску. *Сучасні сталі для газонафтопровідних труб. Проблеми та перспективи. Міжнародний семінар. Доповіді*. Москва, 2006, с. 22–31.
11. Higuchi R., Makino H., Takeuchi I. New Concept and Test Method on Running Ductile Fracture Arrest for High Pressure Gas Pipeline.
12. Пемов І. Ф., Морозов Ю. Д. та ін. Співвідношення роботи руйнування і кількості в'язкої складової в зламі зразків при ВПВ товстолистового прокату, отриманого контрольованою прокаткою. *Металург*, №1, 2012, с. 63–68.

#### References

1. Halsen K. O., Veritas D. N. Drop Weight Tear Testing of High Toughness Pipeline Material. *Proc. of IPC 2004 Int. Pipeline Conference*, October 4–8, 2004 Calgary, Alberta, Canada. p. 87–96.
2. Hwang B., Lee S., Kim Y. M., Kim N. I. Analysis of Inverse Fracture Occurring in Hammer-Impacted Region During Drop-Weight Tear Test of a High-Toughness Linerpipe Steel. *Proceedings of the thirteenth Int. Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, Hawaii, USA, May 25–30, 2003.
3. Wilkowski G., Shim D. J. and Brust F. W., Rudland D., Duan D. Evaluation of Fracture Speed on Ductile Fracture Resistance. *Pipeline Technology Conference*, Ostende, Belgium, October 12–14, 2009.
4. Vakhrusheva V. S., Grimalovskaya E. A. Features of evaluation of the drop weight tear testing specimen fractures of thermomechanical rolling steel. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv*, № 3, 2015, p. 11–15.
5. API 5L3-2023. Recommended Practice for Cunduction Drop Weight Tear Test on Line Pipe.
6. BS EN 10274:2000 Metallic Materials Drop Weight Tear Tests.
7. GOST 30456-2021. Steel products. Rolling plates and pipes steel. Test methods on a shock bend.
8. Erdelen-Peppler M., Gehrman R., Junker G., Liessem A. Significance of Dwt Testing for Li-

nerpipe Safety. *6th International Pipeline Conference IPC*, 2006. Calgary, Canada, September 2006.

9. Nick Osborne. Instrumented drop weight tear testing. *Advanced Materials and Processes*, Vol. 167, Issue 2, February 2009, p. 26–27.
10. Demofonti J., Mannuchchi of J., Di Biaggio M Fonzo A. Fracture arrest evaluation of X100 TMCP Steel Pipes for high pressure Gas transportation Pipelines. "Modern Steels for Gas and Oil Transmission Pipelines". *Problems and perspectives. International seminar. Reports*. Moscow, 2006, p. 22–31.
11. Higuchi R., Makino H., Takeuchi I. New Concept and Test Method on Running Ductile Fracture Arrest for High Pressure Gas Pipeline.
12. Pemov I. F., Morozov Y. D., etc. A ratio of operation of corrupting and quantity of a viscous component in a fracture of hardening, high toughness. samples in case of FWT of the hot-rolled plate received by controlled rolling. *Metallurgist*, №1, 2012, p. 63–68.

**Лючков Анатолій Дем'янович**<sup>1</sup>, к. ф.-м. н., провідний науковий співробітник відділу матеріалознавства, email: vniti.2016@gmail.com., тел. +38(097) 075-51-79,

**Вахрушева Віра Сергіївна**<sup>2</sup>, д. т. н., професор, професор кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів,

email: vs062@ukr.net., тел. +38(067) 632-45-32,  
**Грузин Наталія В'ячеславівна**<sup>2</sup>, к. т. н., доцент кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів, e-mail: hruzin.nataliia@pdaba.edu.ua, тел. +38(097) 727-44-76.

<sup>1</sup>Державне підприємство «Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут трубої промисловості ім. Я. Ю. Осади», вул. Писаржевського, 1 а, м. Дніпро, 49600, Україна.

<sup>2</sup>Український державний університет науки і технологій (УДУНТ) ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Петрова, 24-а, 49600, Дніпро, Україна.

#### Influence of available impact energy of the testing machine on drop weight tear test characteristics of high toughness pipeline steels.

**Abstract. Problem.** Currently, the problem he methodological issues related to drop load testing (DLT) of rolled plates and pipes made of high-viscosity steel for high-pressure gas mains are considered. The imperfection of the current standards in terms of selecting the values of the stored energy of the copra, ensuring the correct testing of metal of the entire size range, is note. **Goal** Evaluation of the influence of stored copra energy on the results of WIP in terms of the amount of viscous component and absorbed fracture energy of full-thickness specimens of high-viscosity pipe steels widely used in the construction of high-pressure gas pipelines. **Methodology.** We examined sheets and base metal

of pipes of strength classes X65, X70 and X80 of various thicknesses manufactured using thermomechanical rolling technology. The falling load tests were performed on Zwick copters of different capacities. **Results** The limits of application of the recommendations of API RP5L3 and EN10274 standards for the choice of the value of the stored energy of the copra during the falling load test of high-viscosity pipe steels have been clarified. The recommendations are applicable only for steels with a thickness of less than 25 mm. Recommendations for selecting the optimal values of the stored energy of the copra at the HDM of high-viscosity pipe steels with a thickness of 25 mm and more are given **Originality**. The influence of stored copra energy on the results of WIP of high-viscosity pipe steels is estimated. **Practical value**. Recommendations were issued on the choice of the value of the stored energy of the ERW copra during testing, which will increase the measurement accuracy and reliability of the assessment of the resistance to destruction of gas pipelines.

**Keywords:** falling load test, stored copra energy, amount of viscous component, absorbed energy, metal hardening, high viscosity steel.

**Lyuchkov Anatoliy**<sup>1</sup>, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, leading scientific researcher department of materials science, email: vniti.2016@gmail.com,

**Vakhrusheva Vira**<sup>2</sup>, Doctor of science, professor department of materials science and materials processing,

ORCID: 0000-0002-2663-2714,

e-mail: [vs062@ukr.net](mailto:vs062@ukr.net),

**Hruzin Natalia**<sup>3</sup>, PhD, Assistant professor department of materials science and materials processing,

ORCID: 0000-0002-7589-6548,

e-mail: [hruzin.nataliia@pdaba.edu.ua](mailto:hruzin.nataliia@pdaba.edu.ua).

<sup>1</sup>State enterprise "Y. Yu. Osada Scientific-Research and Design-Technological Institute of the Pipe Industry", St. Pysarzhevsky, 1 a, 49600, Dnipro, Ukraine.

<sup>2,3</sup>Ukrainian State University of Science and Technologies Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, St. Architect Oleg Petrov, 24-a, 49600, Dnipro, Ukraine.