

УДК 656.259.2

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.41

ВПЛИВ СТРУКТУРНОГО СТАНУ СТАЛЕЙ ВИСОКОЇ В'ЯЗКОСТІ НА ФРАКТОГРАФІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ БУДОВИ ЗЛАМІВ ПІД ЧАС ВИПРОБУВАННЯ ЗРАЗКІВ ВАНТАЖЕМ, ЩО ПАДАЄ (ВІВ, DWTT)

Вахрушева В. С., Грузін Н. В.

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури

Анотація. Досліджена структура зламів зразків сталі типу 10Г2ФБ, Х70, виготовленої способом термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням, під час випробування вантажем, що падає (ВІВ, DWTT). Злами ВВІ (DWTT) високов'язкої ферито-бейнітної листової сталі термомеханічної прокатки відрізняються від зламів звичайної гарячекатаної чи нормалізованої сталі. У роботі наведені результати фактографічного дослідження рельєфу поверхні руйнування зразків ВВІ. У структурі зламів наявні елементи типу «розмірної стрілки». Однак чинні стандарти щодо випробування вантажем, що падає (DWTT), не враховують особливостей структури таких зламів, що ускладнює їхню ідентифікацію за показником кількості в'язкої складової. Злами з розщепленнями та злами типу «розмірної стрілки» можуть бути визнані різновидом в'язкого зламу високов'язкої сталі термомеханічної прокатки з ферито-бейнітною структурою.

Ключові слова: випробування вантажем, що падає (ВВІ (DWTT)), термомеханічна прокатка, в'язкий (крихкий) злам, фактографія, кількість в'язкої складової, розмірна стрілка.

Вступ

Контроль енергоємності руйнування є важливим аспектом забезпечення експлуатаційної безпеки сучасних магістральних газопроводів високого тиску. Технологія такого контролю важлива для запобігання протяжних руйнувань газопроводів, які можуть спричинити збитки для економіки та навколишнього середовища.

Злами ВВІ (DWTT) високов'язкої ферито-бейнітної листової сталі термомеханічної прокатки відрізняються від зламів звичайної гарячекатаної чи нормалізованої сталі. Однак чинні стандарти щодо випробування вантажем, який падає, не враховують особливостей структури таких зламів, що ускладнює їхню ідентифікацію за показником кількості в'язкої складової.

Аналіз публікацій

Із застосуванням у будівництві магістральних газопроводів високого тиску мікролегованих високов'язких сталей, що виготовлені за технологією термомеханічної прокатки, з'явилась нова проблема. Було визначено, що випробування вантажем, що падає (ВІВ), листового прокату і труб з таких сталей найчастіше мають негативні наслідки щодо кількості в'язкої складової у зламі, яка є показником експлуатаційної надійності газопроводу [1, 2].

Відповідно до чинних стандартів кількість в'язкої складової розраховується за результатами вимірювання сумарної площі поверхні зламу з крихким руйнуванням або способом візуального порівняння поверхні зламу з фотографіями еталонних зразків чи самими зразками.

Перший спосіб використовується в Україні та в інших країнах світу для аналізу ферито-перлітних сталей, що не зазнали термомеханічного оброблення, класу міцності до К60, ідентифікація структури яких зазвичай не є складною. Однак фактографічні особливості зламів високов'язких сталей термомеханічної прокатки, що не враховуються стандартною методикою, значною мірою ускладнюють процедуру цього аналізу, роблячи її суб'єктивною й неоднозначною. Для таких сталей необхідно використовувати метод еталонів, структура зламів яких може бути заздалегідь визначена за допомогою сучасних методів дослідження, зокрема растрової електронної мікроскопії.

Згідно з вищезазначеним, дослідження можливості поліпшення результатів випробувань під час тестування ВІВ прокату трубних сталей, вироблених за технологією контрольованої (термомеханічної) прокатки, зокрема з прискореним охолодженням, є актуальним. Wilkowski зі співавторами [3, 4] з інституту Batelle розробили рівняння з лінійною кореляцією між питомою ВІВ (DWTT)

енергією зразків зі стандартним пресованим надрізом і питомою енергією Шарпи – V (CVN) для звичайної гарячекатаної і нормалізованої сталі.

Мета та постановка завдання

Метою роботи є аналіз механізмів руйнування, що визначають структуру типу «розмірної стрілки» за даними растрової електронної мікроскопії у високов'язких сталях контрольованої прокатки, та аналіз в'язкості руйнування.

Виклад основного матеріалу

Досліджена структура зламів зразків ВПВ сталі типу 10Г2ФБ, виготовленої способом термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням. Досліджували листи, товщиною 18,7 і 21,6 мм, температура завершення чистової прокатки яких перебувала в міжкритичному інтервалі та становила 695–750 °С (структурний стан прокату ферит + перліт), і листи цієї самої товщини з температурою завершення чистової прокатки, що була вище за точку A_{r3} (800–825 °С), і структурою ферит + бейніт.

Для прокату зі структурою ферит + перліт за температури випробування, що є вищою за критичну температуру в'язко-крихкого переходу, визначальними є злами ВПВ з розщепленням (рис. 1 а), тобто крихкими тріщинами, паралельними поверхні листа, які утворюються в процесі випробування матеріалу, високої в'язкості та пластичності, якщо стоншення зразка (утяжка) призводить до виникнення напруженого стану, подібного до плоскої деформації.

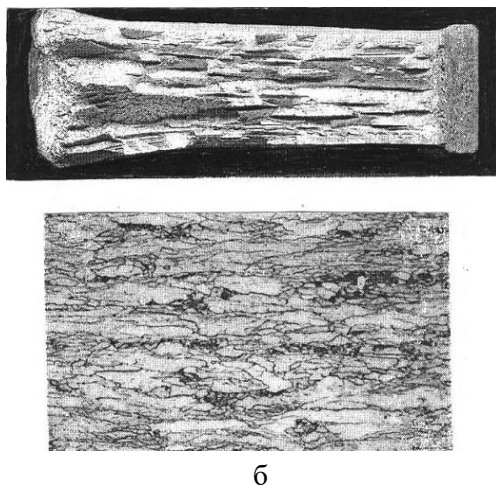


Рис. 1. Сталь X70 з ферито-перлітною структурою після контрольованої прокатки: а – поверхня зламу зразків ВПВ; б – мікроструктура, $\times 500$

За таких умов через особливості формування структури металу під час розпаду наклепаного аустеніту за температури, що є нижчою за A_{r3} , з утворенням витягнутих сплюснених зерен фериту (рис. 1 б) й анізотропії характеристик міцності відбувається більш слабка когезія шарів в напрямку до площини прокатки. У зламах зразків ВПВ сталі зі структурою ферит + бейніт (рис. 2) за таких самих умов випробування загальноприйняті макроскопічні ознаки механізмів руйнування не завжди достатньо й однозначно виражені.

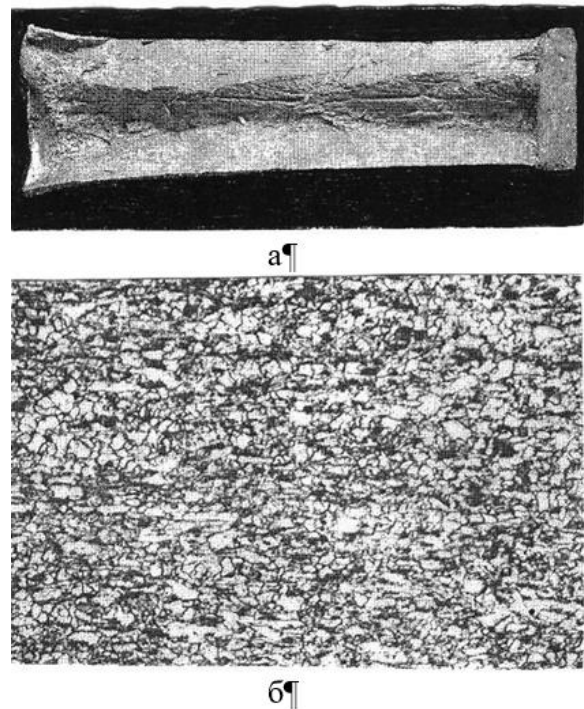


Рис. 2. Сталь X70 з ферито-бейнітною структурою після контрольованої прокатки: а – поверхня зламу зразків ВПВ; б – мікроструктура, $\times 500$

Крім зламів, які наведені на рис. 2а, поверхні руйнування зразків нерідко містять окремі ділянки типу «розмірної стрілки» за класифікацією євростандарту EN 10274 (рис. 2) [5]. Такий вид руйнування за євростандартом є до крихким, на відміну від американського стандарту API RP5L3 [6] та вітчизняного ГОСТ 30456 [7], які взагалі не містять рекомендацій щодо аналізу зламів ділянки типу «розмірної стрілки».

Визначення кількості в'язкої складової за цими стандартами мало б 100-відсотковий результат. Якщо розрахунок здійснити відповідно до стандарту EN 1027, то кількість в'язкої складової буде становити 75 і 55 % у зламах, що наведені на рис. 3 а та 3 б.

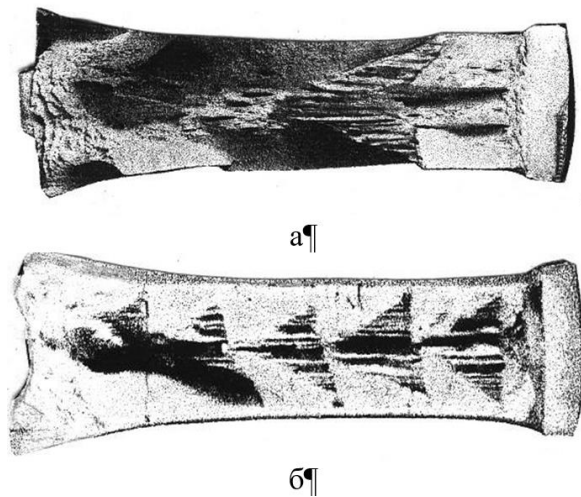


Рис. 3. Зони у вигляді розмірної стрілки в зламї сталї Х70 після контрольованої прокатки: а – одинична ділянка; б – ділянки, що чергуються

Зразки (рис. 3) перед руйнуванням зазнали дуже значної пластичної деформації, що є визначальною для в'язкого руйнування. Для визначення механізмів, відповідальних за формування рельєфу поверхні зламу, у межах ділянок типу «розмірної стрілки» були проведені мікрофрактографічні дослідження на растровому електронному мікроскопі, результати яких наведені на рис. 4.

Зона поверхні зламу виду «розмірної стрілки» (рис. 4) складається з почергових темних (ділянка 1) і більш світлих (ділянка 2) смуг. Всі однотипні смуги паралельні одна одній і в сукупності утворюють ступінчасту поверхню. Більш світлі смуги паралельні площині прокатки листа, а темні утворюють з ними кути (орієнтовно до 45°).

Згідно з мікрофрактограмами, що подані на рис. 4, неоднотипні смуги формуються внаслідок реалізації різних механізмів руйнування: поверхня смуг типу 1 (рис. 4 а) складається з ямок різного розміру, тобто маємо в'язкий тип руйнування. Поверхня смуг типу 2 (рис. 4 в) утворена фасетками відколу з окремими вторинними тріщинами (позначені стрілками). Кордон смуг 1 і 2 поданий на рис. 4 б.

Структура зламу в лівій частині знімка (ділянка 1) така сама, як і на рис. 4 а (в'язкий злам). Права частина знімка (ділянка 2) повторює структуру зламу, що наведена на рис. 4 б (крихкий злам).

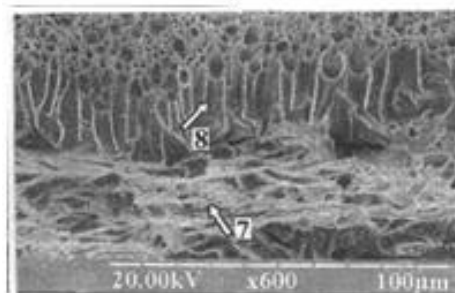
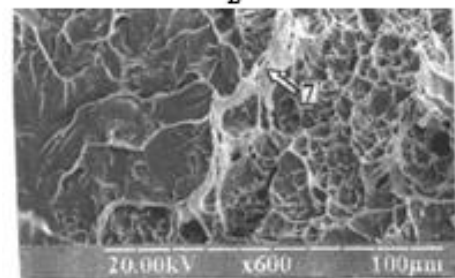
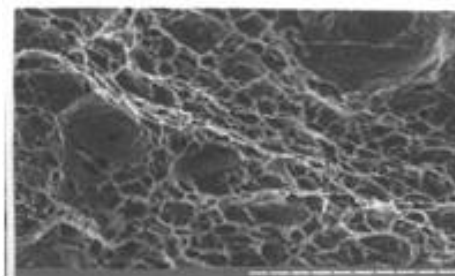
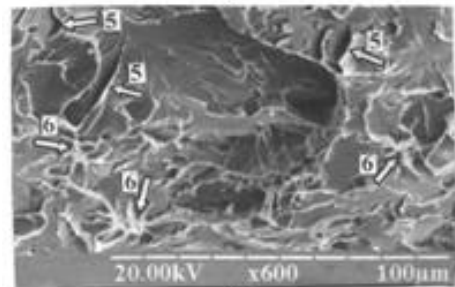
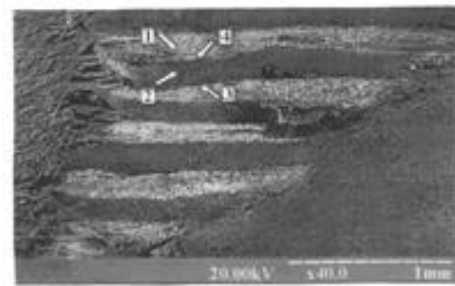


Рис. 4. Будова дільниць зламу виду «розмірної стрілки»: а – фрагмент окремої ділянки зламу; б – структура зламу у світлих смугах (стрілка 1); в – структура зламу в темних смугах (стрілка 2); г – структура зламів на межі світлих та темних смуг (стрілка 3); д – структура зламів на межі світлих та темних смуг (стрілка 4)

Таким чином, зони поверхні зламу виду «розмірної стрілки» на сьогодні не можуть бути однозначно ідентифіковані за механізмом руйнування та коректно враховані під час визначення кількості в'язкої складової.

Аналіз впливу структурного стану матеріалу на показники ВПВ сталі 10Г2ФБ термо-механічної прокатки здійснювали за результатами випробувань за температури мінус 20 °С п'яти дослідних партій прокату. Частку в'язкої складової зламу визначали за методикою американського стандарту API RP5L3 [4]. Енергоємність руйнування зразків визначали за повної поглиненої енергії, розрахованої відповідно до рекомендацій цього стандарту, за середнім значенням поглиненої енергії зразків Шарпі з V надрізом. Максимальні значення кількості в'язкої складової досягають 100 % як для металу зі структурою ферит + перліт (температури закінчення чистої прокатки 695–750 °С), так і структурою ферит + бейніт (800–825 °С), однак мінімальний рівень цього показника істотно відрізняється. Мінімальні значення кількості в'язкої складової ферито-перлітною сталі знаходяться в межах 20–60 %, тоді як для сталі зі структурою ферит + бейніт вони залишаються на рівні 90–95 %. Так само змінюється й енергоємність руйнування сталі зі структурою ферит + перліт і ферит + бейніт. Для першої мінімальні значення поглиненої енергії становлять 3800–6500 Дж, для другої – 9800–10800 Дж. Максимальні показники мають майже однакові значення, що дорівнюють 11000–15500 Дж і 11400–14600 Дж.

Руйнування відривом, як відомо [1, 8], реалізується тоді, коли зі зворотного боку фронту тріщини, що поширюється, залишаються незруйновані ділянки матеріалу – «зв'язки», руйнування яких відбувається за в'язким механізмом, що призводить до формування ямок і гребенів відриву. Такий механізм руйнування, мабуть, притаманний об'ємам матеріалу, що розміщений між світлими смугами, що є системою вторинних крихких тріщин, паралельних площині прокатки і нормальних до головної площини зламу, що подібна до так званих розщеплень, які утворюються за умов виникнення в момент удару зразка трьохосового напруженого стану, та за наявності чинників, що знижують міцність листів, їхньої поверхні напрямку [5]. Одним із таких чинників є бейнітна смугастість у структурі ферито-бейнітних сталей (рис. 5). Для перевірки цього припущення проведено фрактографічне дослідження поверхні руйнування зразка ВПВ такої самої сталі з розщепленнями в зламі. Результати дослідження наведено на рис. 5.

На фрактограмі (рис. 5), що знята з площини розщеплення (рис. 5 а, стрілка 1), наве-

дено крихкий злам, подібний зламу, що наведено на рис. 4 б

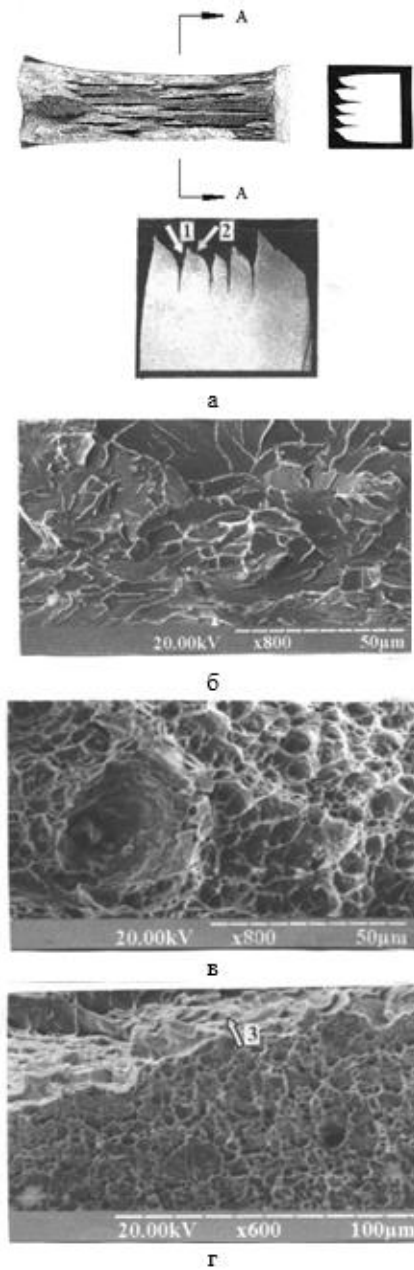


Рис. 5. Будова зламів з розщепленнями: а – зразок ВПВ з розщепленнями; б – структура зламу в площині розщеплення (стрілка 1); в, г – структура зламу в площині (стрілка 2)

Мікрофрактограми поверхні руйнування в місці, позначеному стрілкою 2 на рис. 5 а (рис. 5 в і 5 г), демонструють абсолютну подібність механізмів руйнування, що сформували рельєф зламу цієї поверхні та поверхні темної смуги в зламі «розмірної стрілки».

Ці поверхні утворені способом змішаного руйнування за механізмом поєднання злиття мікропор з відривом, який часто спостеріга-

ється у високоміцних конструкційних матеріалах з високою в'язкістю. Це доводить наявність у структурі рельєфу обох зламів ділянок ямкової будови та гребнів відриву (стрілка 7 на рис. 4 д і стрілка 3 на рис. 5 г).

Таким чином, структурний стан сталі типу 10Г2ФБ істотний впливає на показники ВПВ. Структура сталі ферит + перліт, температура завершення чистової прокатки якої становила 695–750 °С на відміну від сталі зі структурою ферит + бейніт (температура завершення чистової прокатки 800–825 °С) не забезпечує стабільний рівень кількості в'язкої складової у зламах зразків ВПВ. Мінімальні значення цього показника значно нижче за ті, що необхідні згідно з нормативною документацією.

Висновки

Злами DWTT високов'язкої феритобейнітної листової сталі термомеханічної прокатки значно відрізняються від зламів гарячекатаної та нормалізованої сталі. У цих зламах є ділянки типу «розмірної стрілки».

Визначено, що структура досліджених зразків сталі Х70 після термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням є феритобейнітною.

Ділянки поверхні зламу типу «розмірної стрілки» складаються зі світлих та темних смуг, що чергуються. Ця структура формується внаслідок реалізації різних механізмів руйнування: поверхня світлих ділянок утворена фасетками сколу та тріщинами, що з'являються в разі крихкого зламу. Поверхня темних смуг складається з рівноосьових ямок різного розміру, що свідчить про в'язке руйнування.

Злами з розщепленнями і злами типу «розмірної стрілки» можуть бути визнані різновидом в'язкого зламу високов'язкої сталі термомеханічної прокатки з феритобейнітною структурою.

Література

1. Makino H., Takeuchi I., Higuchi R. Fracture arrestability of high pressure gas transmission pipelines by high strength pipelines. Proc. Pipeline Technology Conference, Ostend, Belgium, 2009.
2. Zhu X. K., Leis B. N. Ductile-fracture arrest methods for gas – transmission pipelines using Charpy impact energy or DWTT energy. Journal of Pipeline Engineering. 2013. V. 12. № 3.
3. Wilkowski G., Shim D. J., Brust F. W. Evaluation of Fracture Speed on Ductile Fracture Resistance, International Conference on Pipeline, Ostende, Belgium, October 12–14, 2009.

4. Effect of drade on ductile fracture arrest criteria for gas pipelines / Wilkowski G., Rudland D. L., Xu H., Sanderson N. Proc. International Pipeline Conference, Canada, Paper IPC 006-10350, 2006.
5. DIN EN 10274: 1999. Metallic materials-Drop weight tear test. German version on EN 10274.
6. Standard ANS/API, specification 5L/ISO 3183:2007. *Specifikacya dlya magistral'nyh truo* [Specification for magistral tubes].
7. ДСТУ-3409-96 (ГОСТ3045697). Металопродукція. Прокат листовий на труби сталеві. Методи випробування на ударний вигін.
8. Вахрушева В. С., Лючков А. Д., Пушкаренко М. В. Контроль поширення в'язкої тріщини у сучасних магістральних газопроводах. Металознавство та термічна обробка металів. 2019. № 1(84). С. 19–29.

References

1. Makino H., Takeuchi I., Higuchi R. Fracture arrestability of high pressure gas transmission pipelines by high strength pipelines. Proc. Pipeline Technology Conference, Ostend, Belgium, 2009.
2. Zhu X. K., Leis B. N. Ductile-fracture arrest methods for gas – transmission pipelines using Charpy impact energy or DWTT energy. Journal of Pipeline Engineering. 2013. V. 12. № 3.
3. Wilkowski G., Shim D. J., Brust F. W. Evaluation of Fracture Speed on Ductile Fracture Resistance, International Conference on Pipeline, Ostende, Belgium, October 12–14, 2009.
4. Effect of drade on ductile fracture arrest criteria for gas pipelines / Wilkowski G., Rudland D. L., Xu H., Sanderson N. Proc. International Pipeline Conference, Canada, Paper IPC 006-10350, 2006.
5. DIN EN 10274: 1999. Metallic materials-Drop weight tear test. German version on EN 10274.
6. Standard ANS/API, specification 5L/ISO 3183:2007. *Specifikacya dlya magistral'nyh truo* [Specification for magistral tubes].
7. ДСТУ-3409-96(ГОСТ30456-97) Metaloprodukyiya. Prokat listoviy na trubi stalevi. Metodi viprobuvannya na udarnii vigin.
8. Vakhrusheva V. S., Lychkov A. D., Pushkarenko M. V. Kontrol poshirennja vyazkoi trishini u suchasnikh magistralnikh gazoprovodakh. Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv. 2019. № 1(84). С.19–29.

Вахрушева В.С., д. т. н., проф. кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів, e-mail: vs062@ukr.net ORCID: 0000-0002-2663-2714,

Грузін Н.В., к.т.н., доц. кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів,

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: hruzin.nataliia@pdaba.edu.ua, ORCID:0000-0002-7589-6548.

The influence of the structural condition of high-strength steel on the fractographic characteristics of the fracture structure when testing the specimens with a falling load (VPV, DWTT)

Abstract. Problem. The fracture structure of samples tested by a falling load (VPV, DWTT) of steel type 10G2FB, X70 produced by the method of thermomechanical rolling with accelerated cooling was investigated. The DWTT fractures of high-viscosity ferrite-bainite sheet steel of thermomechanical rolling differ significantly from the fractures of ordinary hot-rolled or normalized steel. The results of a fractographic study of the topography of the DWTT samples fracture surface are presented in the paper. **Methodology.** The paper presents the results of a fractographic study of the topography of the fracture surface of VPV sample. Steels with a ferrite-bainite structure after thermomechanical treatment were studied. **Result.** In the structure of fractures, elements of the "dimensional arrow" type were found. However, the current standards for the falling load test (DWTT) do not take into account the peculiarities of the structure of such fractures, which makes it difficult to identify them by the amount of viscous component. Fractures with splits and fractures of the "dimensional arrow" type can probably be recognized as a type of ductile fracture of high-viscosity thermomechanically rolled steel with a ferrite-bainite structure. Currently, the

presence of splits in the fracture of VPV samples of high-viscosity steel is considered an unambiguous indicator of its generally viscous failure. Therefore, based on the similarity of the mechanisms of local destruction that form fractures with splits and fractures of the "dimensional arrow" type, the latter can probably be recognized as a specific type of viscous fracture of high-viscosity thermomechanically rolled steel with a ferrite-bainite structure. Enterprises need the creation of sample break scales for product quality control. **Practical value.** The conducted research made it possible to draw up scales that are used in the assessment of product quality at manufacturing plants.

Key words: falling load test (DWTT), thermomechanical rolling, ductile (brittle) fracture, fractography, amount of ductile component, dimensional arrow.

V. S. Vakhrusheva Doctor of science, professor, Department of Materials Science and Treatment of Materials, e-mail: vs062@ukr.net
ORCID: 0000-0002-2663-2714.

N. V. Hruzin PhD, Assistante professor Department of Materials Science and Treatment of Materials, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture (Dnipro, Ukraine), e-mail: hruzin.nataliia@pdaba.edu.ua,
ORCID:0000-0002-7589-6548.
