

УДК 669-156:620.178.74.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ ВЫСОКОВЯЗКИХ ТРУБНЫХ СТАЛЕЙ

ВАХРУШЕВА В. С.¹, *д.т.н., проф.*,
ГРИМАЛОВСКАЯ Е. А.^{2*}, *аспирант*

¹ кафедра материаловедения и обработки материалов. Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

^{2*} кафедра материаловедения и обработки материалов. Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел.+38-066-429-73-17, e-mail: evgenia-grim@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-3920-4946

Аннотация. *Цель.* Новые способы получения высокопрочных конструкционных материалов приводят к формированию новых типов структуры в металлах, а также изменяют характер разрушения при испытании. Вследствие этого появляются трудности контроля распространения вязкой трещины. Поэтому целью данной работы является анализ подходов к определению уровня вязких свойств, определению сопротивления разрушению высоковязких трубных сталей. *Методика.* В работе проведен анализ существующих методов определения сопротивления разрушению высокопрочных трубных сталей. *Результаты.* Показано, что методы определения сопротивления разрушению современных высоковязких и высокопрочных сталей часто недостаточно точны, требуют корректировки и дальнейших исследований. *Научная новизна.* Проведенный анализ выявил недостатки и несовершенство существующих методов оценки распространения вязкой трещины. *Практическая значимость.* В работе доказана необходимость создания универсальной методики позволяющей объективно и надежно определить сопротивление разрушению высоковязких трубных сталей.

Ключевые слова: методы оценки сопротивления разрушению, высоковязкие стали, энергия разрушения

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ РУЙНУВАННЮ ВИСОКОВ'ЯЗКИХ ТРУБНИХ СТАЛЕЙ

ВАХРУШЕВА В. С.¹, *д.т.н., проф.*,
ГРИМАЛОВСЬКА Є. А.^{2*}, *аспірант*

¹ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

^{2*} кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел.+38-066-429-73-17, e-mail: evgenia-grim@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-3920-4946

Анотація. *Мета.* Нові способи отримання високоміцних конструкційних матеріалів приводить до формування нових типів структури у металах, а також змінюють характер руйнування при випробуванні. В зв'язку з цим з'являються труднощі контролю розповсюдження в'язкої тріщини. Тому метою даної роботи є аналіз основних підходів до визначення рівня в'язких властивостей, визначення опору руйнуванню високоміцних трубних сталей. *Методика.* У роботі проведено аналіз існуючих методів визначення опору руйнуванню високоміцних трубних сталей. *Результати.* Показано, що методи оцінки опору руйнуванню високоміцних та високов'язких сталей часто недостатньо точні, потребують корегування та подальших досліджень. *Наукова новизна.* Проведений аналіз виявив недоліки та недосконалості існуючих методів оцінки розповсюдження в'язкої тріщини. *Практична значимість.* У роботі доказана необхідність створення універсальної методики, яка дозволить об'єктивно та надійно визначати опір руйнуванню високов'язких трубних сталей.

Ключові слова: методи оцінки опору руйнуванню, високов'язкі сталі, енергія руйнування

METHODS FOR BREAKING STRENGTH DETERMINATION OF HIGH- DUCTILE PIPELINE STEELS

VAHRUSHEVA V. S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
GRIMALOVSKAYA E. A.^{2*}, *postgraduate st.*

¹ department of Materials Science and Treatment of Materials, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

^{2*} department of Materials Science and Treatment of Materials, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38-066-429-73-17, e-mail: evgenia-grim@yandex.ua, ORCID ID: 0000-0002-3920-4946

Abstract. Purpose. New methods of high-strength construction materials receiving lead to formation of new types of the metal structure and change the fracture mode at the test. In connection with it, problems of ductile fracture propagation control are arisen. The aim of the paper is to analyze basic approaches of the ductile properties' level determination and breaking strength determination of high-strength pipeline steels. **Methodology.** In this paper, existing methods for breaking strength determination of high-ductile pipeline steels are analyzed. **Results.** It is shown that methods for breaking strength determination of high-strength and high-ductile pipeline steels are often insufficiently exact, and they are in need of correction and further investigations. **Originality.** The analysis discovers disadvantages and imperfections of existing methods of ductile fracture propagation evaluation. **Practical value.** In this paper necessity to create the universal methodology that allows fairly and exactly determinate breaking strength of high-ductile pipeline steels is proved.

Keywords: methods for breaking strength determination, high-ductile steels, destruction energy

Введение

В современном мире происходит постоянный рост потребности в чистой энергии, что приводит к освоению месторождений природного газа в отдалённых районах, таких как центральная Азия, Россия и береговые линии Канады и Аляски. Высокая капиталоемкость магистрального транспорта предопределяет необходимость поиска снижения удельных затрат на транспортировку продукции. Единственный реальный способ транспортировки большого количества этого вещества на дальние расстояния – это передача по трубопроводам большого диаметра [1,2]. При этом повышается как диаметр труб (до 1420 мм) так и рабочее давление при одновременном росте пропускной способности трубопроводов. Однако, использование в трубопроводах сталей обычных категорий прочности для работы в таких условиях требует применения труб с соответствующей толщиной стенки. Как следствие этого, в последнее десятилетие действующие компании разрабатывают очень высокопрочные, высоковязкие стали, что позволяет использовать трубы с меньшей толщиной стенки. Так изготавливают прототип стали категории X100 и разрабатывают трубную сталь X120 [3].

Все экспериментальные и исследовательские работы показывают, что производители стали успешно разрабатывают новые классы высокопрочных сталей, отвечающих резко возросшим за последние годы требованиям к контролю распространения вязкой трещины в таких материалах. Однако, существуют недостатки, которые относятся к несовершенству контроля распространения вязкой трещины, а следовательно к оценке их качества на заводах-изготовителях труб [4].

Цель

Целью данной работы является анализ подходов к определению уровня вязких свойств, определению сопротивления разрушению высоковязких трубных сталей.

Методика и результаты

В работе проведен анализ существующих методов оценки сопротивления высоковязких трубных сталей.

Традиционно для оценки сопротивления разрушению трубных сталей используют метод испытания образца Шарпи с V-образным надрезом на ударный изгиб. Этот метод испытания применяется длительное время и приведен в качестве основного метода оценки металла трубных сталей в международном стандарте ISO 3183 [5]. Сложности определения ударной вязкости возникли с появлением новых структур, а именно при переходе от феррито-перлитных к высоковязким феррито-бейнитным и бейнитным сталям с разной степенью дисперсности. Испытания на ударный изгиб образцов Шарпи высоковязких сталей часто приводит к искажению результатов или неполному разрушению образцов. Кроме того, испытание образцов по Шарпи с V-образным надрезом имеет ряд недостатков, а именно: толщина стенок образца меньше толщины стенок трубы; траектория трещины всего 8 мм. Такие испытания учитывают только полную работу разрушения, не разделяя ее на фазы зарождения и распространения трещины [4].

Распространение трещины – это сложное, не до конца изученное явление, теория которого пока ещё далека от совершенства [6]. Поэтому когда разрабатываются новые материалы для трубопроводов, существенным образом изменяются технология их производства, возникает необходимость в транспортировке новых продуктов или повышается рабочее давление, то для оценки работоспособности трубопроводов применяют полномасштабные пневматические испытания. Цель такого испытания состоит в определении энергии остановки трещины, т.е. вязкости стали, достаточной для полной остановки разрушения в границах допустимой длины (1-3 длин трубы). Однако, натурные испытания громоздки, трудоемки и достаточно дороги.

В связи с этим получили развитие полумпирические методы прогнозирования

остановки трещины. Одним из таких методов является метод двух кривых Battelle [4]. Этот метод рассматривает газовую декомпрессию (ведущая кривая) и динамическое сопротивление распространению трещины (кривая сопротивления) как несвязанные процессы, конкуренция которых определяет скорость распространения трещины. Вязкая трещина распространяется в газопроводе, когда скорость декомпрессии газа, определяющаяся давлением у вершины трещины, ниже, чем скорость роста трещины. Трещина останавливается, когда ее скорость становится выше скорости декомпрессии газа. В методе Battelle сопротивление распространению трещины связывают с параметром вязкости стали через поглощенную энергию Шарпи-V посредством эмпирической корреляции. Величина необходимая для остановки, прогнозируемая данным методом, подтверждалась натурным испытанием с нарастающим распределением вязкости для обычного уровня давления и труб категории прочности X70 и ниже [7]. Но авторами [6,8] было показано, что сопротивление разрушению современных высоковязких сталей, категории прочности X80 и выше, не может быть точно определено по величине поглощенной энергии Шарпи-V [9]. Причина этого состоит в размерном несоответствии условий распространения трещины в образцах Шарпи и реальных трубах. Для компенсации расхождения предлагался поправочный коэффициент 1,4 или 1,7 [7,10].

В связи с несовершенством метода двух кривых Battelle было предложено несколько новых параметров сопротивления разрушению трубных сталей. Наиболее надежным из них считается расчет поглощенной энергии Шарпи-V с использованием приближений Wilkowski 2000 и HLP. Эти приближения показали минимальные отклонения прогнозных оценок от результатов натурных испытаний на остановку трещины [11].

В приближении Wilkowski 2000 соотношение минимальной энергии остановки трещины Шарпи-V и минимальной энергии остановки трещины ИПГ выражается уравнением:

$$\left(\frac{E}{A}\right)_{Charpy(W2000)} = \frac{175 \left[1.3 \left(\frac{E}{A}\right)_{PN-DWTT} \right]^{0.385}}{3} \quad (1)$$

где:

$(E/A)_{Charpy(W2000)}$ – минимальная энергия остановки трещины Шарпи-V, фт-фнт/кв.дюйм;

$(E/A)_{PN-DWTT}$ – минимальная энергия остановки трещины при испытании падающим грузом для стандартного образца с пресованным надрезом, фт-фнт/кв.дюйм [12].

Применение уравнения с приближением Wilkowski 2000 для высокопрочных труб (X80 и выше) показало хорошие результаты прогнозирования остановки распространения трещины.

Параллельно с работой Wilkowski, японские ученые разработали собственную модель прогнозирования, где кривая сопротивления материала выражена через энергию предшествующую разрушению. Однако, авторы признали, что данной модели необходимы дальнейшие усовершенствования [13].

В начале 1980-х годов специалистами British Steel [14] были проведены обширные испытания по определению удельной поглощенной энергии при испытании падающим грузом, которую можно использовать как количественный показатель, вместо того, чтобы опираться на корреляцию с полномасштабными испытаниями. Так было показано, что при заданной геометрии образца, удельная энергия разрушения может быть выражена как функция двух параметров R_c и S_c (два параметра приближения). С физической точки зрения, R_c представляет собой энергию необходимую для образования двух новых поверхностей разрушения, а S_c – средняя энергия затраченная на пластическую деформацию в зоне, прилегающей к поверхности разрушения, на единицу объема. Отсюда:

$$\frac{E_t}{A} = R_s + S_c (W - a_0) \quad (2)$$

где E_t – общая поглощенная энергия испытываемого образца;

A – начальная площадь разрушения;

W – ширина образца;

a_0 – глубина надреза.

Авторы также утверждают, что удельная энергия, требуемая для разрушения в трубопроводе, где область пластической деформации ограничена еще и диаметром, может быть выражена как [4]:

$$\frac{E_t}{A} = 2R_s + Z * S_c * D \quad (3)$$

где параметры R_c и S_c измерены после лабораторных испытаний;

D – диаметр трубы;

Z – постоянная, равная длине пластически деформированной зоны вблизи трещины, пропорциональной диаметру трубы.

Применение этого метода ограничено сравнительно бедной базой данных экспериментальных измерений пластической зоны.

Одним из способов контроля трещиностойкости основного металла является определение критического раскрытия у вершины трещины (CTOD). Методика таких испытаний может быть различной. Одной из перспективных разработок является исследование параметра критического угла раскрытия трещины (CTOA). Можно выделить два основных подхода к определению значения CTOA: первый – это непосредственное визуальное определение угла на поверхности испытываемого образца [15–17] в различных вариантах его реализации, второй – расчетно-инструментальное определение этого угла [18]. Однако, систематические исследования, позволяющие связать

величину СТОА с известными характеристиками материала, температурой испытаний, толщиной, отсутствуют. Это не позволяет в полной мере использовать этот критерий как единый для оценки сопротивления разрушению материала.

При определении трещиностойкости металла труб наиболее информативным, по мнению авторов [18] является определение характеристики стабильного вязкого подраста трещины после ее страгивания – зависимости раскрытия трещины или J-интеграла от величины подраста трещины. Угол наклона этих кривых может быть связан с количественной формулировкой условия старта трещины по вязкому механизму. Также показано, что при проведении испытаний на трещиностойкость целесообразен переход на образцы типа SENT (образцы на растяжение с краевой трещиной), которые обеспечивают большее подобие напряженно-деформированного состояния в вершине трещины.

Научная новизна и практическая значимость

Проведенный анализ выявил недостатки и несовершенство существующих методов оценки распространения вязкой трещины. В работе доказана необходимость создания универсальной методики позволяющей объективно и надежно определить

сопротивление разрушению высоковязких трубных сталей.

Выводы

В работе проанализированы основные методы определения сопротивления разрушению современных высоковязких и высокопрочных сталей, а именно метод испытания образца Шарпи с V-образным надрезом на ударный изгиб, полномасштабные пневматические испытания, метод двух кривых Battelle, расчет поглощенной энергии Шарпи-V с использованием приближения Wilkowski 2000 и HLP, определение двух параметров приближения, а также определение критического раскрытия у вершины трещины (CTOD). Эти методы часто недостаточно точны, требуют корректировки и дальнейших исследований. Их основным недостатком является искажение результатов для сталей категории прочности X80 и выше по причине невозможности точно оценить механизм распространения вязкой трещины в таких материалах. В связи с этим наиболее надежным методом можно считать сравнение поверхности излома со шкалами эталонов для оценки количества вязкой составляющей в изломе образцов при испытании падающим грузом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Русакова В.В., Лобанова Т.П. Перспективы применения высокопрочных труб категории прочности K65(X80) для проектов дальнего транспорта газа. Наука и техника в газовой промышленности. №1, 2009, стр.4-7. – Режим доступа: www.naukaitechnika.com.
2. Colbett K.T., et al.: High Strength Steel Pipeline Economics. Proc. Thirteenth ISOPE Conference, Hawaii USA, May 2003
3. Felber S., Loibnegger F. The pipeline-steels X100 and X120. XI-929-09.
4. Demofonti G., Mannucci G., Roovers P. Existing methods for the evaluation of material fracture resistance for high-grade steel pipelines. Joint Technical Meeting, Canberra, 16-19th April, 2007. – Режим доступа: www.researchgate.net.
5. ISO 3183:2007. Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation system. – Режим доступа: www.iso.org
6. Cosham A., Jones D.G., Eiber R., Hopkins Ph. Don't drop the drop-weight tear test. International Conference on Pipeline Technology, Ostende, Belgium, October 12-4 2009. – Режим доступа: www.pipemag.com.
7. Maxey W.A., Kiefner J.F., Eiber R.J., "Ductile Fracture Arrest in Gas Pipelines", NG-18 Report No. 100 AGA, 1976.
8. Демофонти Дж., Маннуччи Дж. и др. Оценка остановки распространения разрушения в стальных трубах X100, полученных по технологии ТМКО, для газопроводов высокого давления. / Современные стали для газонефтепроводных труб. Проблемы и перспективы. Международный семинар. Доклады. – Москва, 2006, с.22.
9. Макино Х., Хигучи Р., Такахаша Н., Такеучи И. Новая модель прогнозирования развития и остановки трещин в газопроводах высокого давления. Наука и техника в газовой промышленности. №1, 2009, стр.50-55. – Режим доступа: www.naukaitechnika.com.
10. Demofonti G., Mannucci G., Biangio Di., Fonzo A., "Arrest Assessment of X100 TMCP Linepipe used for High Pressure Gas Pipeline". Proceedings of International Seminar for X80 High Pressure Gas Transmission Pipeline, 2007, January, Xian, China.
11. Mannucci G., Demofonti G. Control of ductile fracture propagation in X80 gas linepipe. Centro Sviluppo Material SpA. Roma. Italy, 3rd Quarter 2011. – Режим доступа: www.pipemag.com.
12. Wilkowski G., Rudland D., Wang Y.Y. "Recent Development on Determining Steady-State Dynamic Ductile Fracture Toughness From Impact Tests", Proceedings of 3rd International Pipeline Technology Conference, Brugge, Belgium, May 21-24, 2000, Volume 1, pp.359-386.
13. Sugie et al. "Propagating shear fracture in natural gas transmission pipeline. Eighteenth Symposium on Fracture Mechanics, ASTM STP 945, Philadelphia, 1988. – Режим доступа: www.researchgate.net.
14. Priest A.H. et al. International Journal of Fracture, 17, pp. 277-299, 1981.
15. Reuven R. et al. CTOA results for X65 and X100 pipeline steels: influence of displacement rate / Proceedings of IPC 2008. Calgary Alberta.
16. Schwable K.-H. et al. Fracture mechanics testing on specimens with low constraint — standardisation activities within ISO and ASTM// Engng. Fract. Mech. 2005. V. 70. P. 557–576. – Режим доступа: www.researchgate.net.

17. Xu S. et al. Measurement of CTOA of pipe steels using MDCB and DWTT specimens / Proceedings of IPC 2010. Calgary Alberta. – Режим доступа: www.researchgate.net.
18. Ильин А.В., Гусев М.А. Новые методики исследования сопротивления разрушению металла труб для магистральных газопроводов. Черная металлургия. Москва. Выпуск 6, 2013, стр.47-59. – Режим доступа: www.energostal.kharkov.ua.

REFERENCES

1. Rusakova V.V., Lobanova T.P. *Perspektivu premineniya vusokoprochnykh trub kategorii prochnosti K65 (X80) dlya proektov dal'nego transporta*. [Prospects for Application of High Strength K65 (X70) Linepipes for Long-Distance Gas Transmission Projects]. *Nauka i tehnika v gazovoy promyshlennosti*. [Science and Technology in Gas Industry]. №1, 2009, pp.4-7. (in Russian). Available at: www.naukaitehnika.com.
2. Colbett K.T., et al.: High Strength Steel Pipeline Economics. Proc. Thirteenth ISOPE Conference, Hawaii USA, May 2003
3. Felber S., Loibnegger F. The pipeline-steels X100 and X120. XI-929-09.
4. Demofonti G., Mannucci G., Roovers P. Existing methods for the evaluation of material fracture resistance for high-grade steel pipelines. Joint Technical Meeting, Canberra, 16-19th April, 2007. Available at: www.researchgate.net.
5. ISO 3183:2007. Petroleum and natural gas industries – Steel pipe for pipeline transportation system.
6. Cosham A., Jones D.G., Eiber R., Hopkins Ph. Don't drop the drop-weight tear test. International Conference on Pipeline Technology, Ostende, Belgium, October 12-4 2009. Available at: www.pipemag.com.
7. Maxey W.A., Kiefner J.F., Eiber R.J., "Ductile Fracture Arrest in Gas Pipelines", NG-18 Report No. 100 AGA, 1976.
8. Demofonti G., Mannucci G. et al. *Otsenka ostanovki rasprostraneniya razrusheniya v stal'nykh trubakh X100, poluchenykh po technologii TMKO, dlya gazoprovodov vysokogo davleniya*. [Evaluation of crack propagation arrest of X100 TMCP linepipe of high-pressure gas pipeline] / *Sovremenyie stali dlya gazonefteprovodnykh trub. Problemy i perspektivy. Mezhdunarodnyy seminar. Doklady*. [Modern steels for gas transmission pipeline. Problems and perspectives. Proceedings of International Seminar] – Moscow, 2006, p.22. (in Russian).
9. Makino H., Higuchi R., Takahashi N., Takeuchi I. *Novaya model' prognozirovaniya razvitiya i ostanovki treshin v gazoprovodakh vysokogo davleniya*. [New Prediction Model for Crack Propagation and Arrest in High-Pressure Gas Pipeline] *Nauka i tehnika v gazovoy promyshlennosti*. [Science and Technology in Gas Industry]. №1, 2009, pp.50-55. (in Russian). Available at: www.naukaitehnika.com.
10. Demofonti G., Mannucci G., Biangio Di., Fonzo A., "Arrest Assessment of X100 TMCP Linepipe used for High Pressure Gas Pipeline". Proceedings of International Seminar for X80 High Pressure Gas Transmission Pipeline, 2007, January, Xian, China.
11. Mannucci G., Demofonti G. Control of ductile fracture propagation in X80 gas linepipe. Centro Sviluppo Material SpA. Roma. Italy, 3rd Quarter 2011. Available at: www.pipemag.com.
12. Wilkowski G., Rudland D., Wang Y.Y. "Recent Development on Determining Steady-State Dynamic Ductile Fracture Toughness From Impact Tests", Proceedings of 3rd International Pipeline Technology Conference, Brugge, Belgium, May 21-24, 2000, Volume 1, pp.359-386.
13. Sugie et al. "Propagating shear fracture in natural gas transmission pipeline. Eighteenth Symposium on Fracture Mechanics, ASTM STP 945, Philadelphia, 1988. Available at: www.researchgate.net.
14. Priest A.H. et al. International Journal of Fracture, 17, pp. 277-299, 1981.
15. Reuven R. et al. CTOA results for X65 and X100 pipeline steels: influence of displacement rate / Proceedings of IPC 2008. Calgary Alberta.
16. Schwable K.-H. et al. Fracture mechanics testing on specimens with low constraint — standardisation activities within ISO and ASTM// Engng. Fract. Mech. 2005. V. 70. P. 557–576. Available at: www.researchgate.net.
17. Xu S. et al. Measurement of CTOA of pipe steels using MDCB and DWTT specimens / Proceedings of IPC 2010. Calgary Alberta. Available at: www.researchgate.net.
18. Il'in A.V., Gusev M.A. *Novye metodiki isledovaniya soprotivleniya razrusheniyu metala trub dlya magistral'nykh gazoprovodov*. [The New Methodologies of the Investigation into the Breaking Strength of the Pipe Metal for the Breaking Strength of the Pipe Metal for the Cross-Country Gas Pipe-Line]. *Chernaya metallurgiya*. [Ferrous Metallurgy]. Moscow. №6, 2013, pp.47-59. (in Russian). Available at: www.energostal.kharkov.ua.

Статья рекомендована к публикации д.т.н., проф. Д.В. Лаухиним (Украина); д.т.н. В.М. Волчуком (Украина).