

УДК 656.259.2

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260319.19.297

КОНТРОЛЬ ПОШИРЕННЯ В'ЯЗКОЇ ТРІЩИНИ У СУЧАСНИХ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДАХ

ВАХРУШЕВА В. С.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
ЛЮЧКОВ А. Д.², *к. ф.-м. н., вед. науков. співр.*,
ПУШКАРЕНКО М. В.³, *магістр*

^{1*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва і архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 388-67-94, e-mail: vs062@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

² Державне підприємство «Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут трубно-промислової ім. Я. Ю. Осади», вул. Пісаржевського, 1-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 075-51-79

³ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва і архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 035-14-27, e-mail: nikshustrii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6253-8637

Анотація. Постановка проблеми. Контроль поширення руйнування є важливим аспектом забезпечення експлуатаційної безпеки сучасних магістральних газопроводів високого тиску. Технологія такого контролю має вирішальне значення для запобігання протяжних в'язких руйнувань газопроводів, які можуть спричинити серйозний збиток для економіки та навколишнього середовища. Опір поширенню рухомої тріщини – це властивість матеріалу, що забезпечує його здібність до зупинки протяжних руйнувань. Показником такої здібності є мінімальна поглинута енергія зупинки в'язкої тріщини, котру оцінюють за результатами повномасштабних випробувань на розрив спеціальних трубних секцій. Такі випробування достатньо громіздкі та дорогі. Тому для визначення енергії зупинки тріщини, що рухається, був запропонований розрахунковий метод двох кривих (ВТСМ), у якому енергія зупинки виражена через поглинуту енергію Шарпі-V. ВТСМ був розроблений на початку 70-х років минулого століття і успішно використовувався для сталей за категоріями міцності до Х65 з малою та середньою в'язкістю. З появою нових високоміцних і високов'язких трубних сталей, виготовлених за технологією термомеханічної прокатки, було встановлено, що для таких сталей безпосередньо виміряна енергія Шарпі-V не є надійним показником опору руйнування. Тому було вирішено визначати енергію Шарпі-V зупинки тріщини за допомогою рівнянь кореляції енергії Шарпі-V та енергії випробування падаючим вантажем (ВПВ). Відомий ряд таких рівнянь. Однак, як показав аналіз, усі вони мають істотні обмеження і недоліки, що потребують оцінки ефективності та коректності використання цих рівнянь для визначення енергії зупинки в'язкої тріщини методом ВТСМ у високов'язких трубних сталях різних категорій міцності та товщини. **Мета.** Оцінка відповідності рівнянь кореляції поглинутої енергії Шарпі-V та ВПВ реальним (експериментальним) співвідношенням цих показників досліджуваних високов'язких трубних сталей. **Матеріал та методика.** У якості матеріалу для досліджень були обрані високов'язкі сталі для магістральних газопроводів категорії міцності Х80, Х70 і Х65 різної товщини. Випробування падаючим вантажем (ВПВ) проводили на інструментальних копрах вертикального типу фірми Zwick. Випробували повнотовщинні зразки з пресованим надрізом у режимі автоматичної реєстрації кривих зусилля-переміщення. Визначали повну поглинуту енергію руйнування, енергію зародження та енергію поширення тріщини. У відповідності до стандарту API RP5L3-96 (2007) та стандарту BSEN 10274:1999 оцінювали кількість в'язкої складової у зламах повнотовщинних зразків ВПВ. Енергію Шарпі-V визначали за стандартом ГОСТ 9454-78 на зразках типу Н. **Результати.** Отримані реальні (експериментальні) співвідношення поглинутої енергії Шарпі-V та ВПВ сучасних високов'язких трубних сталей, широко використовуваних у будівництві магістральних газопроводів. **Наукова новизна.** Проаналізований сучасний стан проблеми оцінки опору руйнуванню високов'язких трубних сталей для магістральних газопроводів високого тиску. Показано, що лінійне рівняння кореляції, розроблене Wilkowski для гарячекатаної та нормалізованої сталі категорій міцності до Х65 повністю відповідає реальному співвідношенню поглинута енергія ВПВ – поглинута енергія Шарпі-V високов'язких сталей термомеханічної прокатки товщиною до 25 мм. При більшій товщині сталі жодне з розглянутих рівнянь кореляції не відповідає реальному співвідношенню рівнянь ВПВ та Шарпі-V. Для високов'язких сталей такої товщини при визначенні енергії зупинки в'язкої тріщини методом ВТСМ доцільно використовувати реальні співвідношення поглинутої енергії ВПВ та Шарпі-V або вдосконалювати методику розрахунку у напрямку безпосереднього використання енергії ВПВ замість енергії Шарпі-V, розрахованої за рівняннями кореляції. **Практична цінність.** Уточнено умови використання метода ВТСМ разом з напівемпіричними рівняннями кореляції поглинутої енергії Шарпі-V та ВПВ і реальним співвідношенням цих показників при визначенні енергії зупинки в'язкої тріщини у газопроводах із сучасних високов'язких сталей.

Ключові слова: зупинка в'язкої тріщини; повномасштабні випробування на розрив; газопровідні труби; метод двох кривих Batelle (ВТСМ); випробування падаючим вантажем (ВПВ); енергія Шарпі-V, енергія ВПВ; рівняння кореляції; категорії міцності Х65, Х70, Х80; поглинута енергія

КОНТРОЛЬ РАСПОСТРАНЕНИЯ ВЯЗКОЙ ТРЕЩИНЫ В СОВРЕМЕННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

ВАХРУШЕВА В. С.^{1*}, *д. т. н., проф.*,
ЛЮЧКОВ А. Д.², *к. ф.-м. н., вед. научн. сотр.*,
ПУШКАРЕНКО Н. В.³, *магистр*

^{1*} Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (099) 388-67-94, e-mail: vs062@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

² Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности им. Я. Е. Осады», ул. Писсаржевского, 1-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (097) 075-51-79

³ Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 035-14-27, e-mail: nikshustrii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6253-8637

Аннотация. Постановка проблемы. Контроль распространения разрушения является важным аспектом обеспечения эксплуатационной безопасности современных магистральных газопроводов высокого давления. Технология такого контроля имеет решающее значение для предотвращения протяженных вязких разрушений газопроводов, чреватых серьезными ущербами для экономики и окружающей среды. Спротивление распространению движущейся трещины – это свойство материала, определяющее его способность к остановке протяженных разрушений. Показателем такой способности является минимальная поглощенная остановки вязкой трещины, которую оценивают по результатам полномасштабных натурных испытаний на разрыв специальных трубных секций. Такие испытания достаточно громоздки и дороги. Поэтому для определения энергии остановки движущейся трещины Batelle был предложен расчетный метод двух кривых (ВТСМ), в котором энергия остановки выражена через поглощенную энергию Шарпи-V. ВТСМ был разработан в начале 70-х годов прошлого столетия и успешно использовался применительно к сталям категорий прочности до Х65 с малой и средней вязкостью. С появлением новых, высокопрочных и высоковязких трубных сталей, изготовленных по технологии термомеханической прокатки, было установлено, что для таких сталей непосредственно измеренная энергия Шарпи-V не является надежным показателем сопротивляемости разрушению. Поэтому было решено определять энергию Шарпи-V остановки трещины по значениям поглощенной энергии испытания падающим грузом ИПГ Шарпи-V и энергии ИПГ. Известен ряд таких уравнений. Однако, как показал анализ, все они имеют существенные ограничения и недостатки, требующие оценки корректности и эффективности применения этих уравнений для определения энергии остановки вязкой трещины методом ВТСМ в высоковязких трубных сталях различных категорий прочности и толщины. **Цель.** Оценка соответствия уравнений корреляции поглощенной энергии Шарпи-V и ИПГ реальным (экспериментальным) соотношениям этих показателей исследуемых высоковязких трубных сталей. **Материал и методика.** В качестве материала для исследований выбраны высоковязкие стали для магистральных газопроводов категорий прочности Х80, Х70 и Х65 различной толщины. Испытания падающим грузом (ИПГ) проводили на инструментальных копрах вертикального типа фирмы Zwick. Испытывали полно толщинные образцы с пресованным надрезом в режиме автоматической регистрации кривых усилие-перемещение. Определяли полную поглощенную энергию разрушения, энергию разрушения, энергию зарождения и энергию распространения трещины. В соответствии со стандартом API RP5L3-96 (2007) и стандартом BSEN 10274:1999 оценивали количество вязкой составляющей и изломах полно толщинных образцов ИПГ. Испытание на разрыв падающим грузом Энергию Шарпи-V (KV) определяли по стандарту ГОСТ 9454-78 на образцах типа Н. **Результаты.** Получены реальные (экспериментальные) соотношения поглощенной энергии Шарпи-V и ИПГ современных высоковязких трубных сталей, широко применяемых в строительстве магистральных газопроводов. **Научная новизна.** Проанализировано современное состояние проблемы оценки сопротивления разрушению высоковязких трубных сталей для магистральных газопроводов высокого давления. Показано, что линейное уравнение корреляции, разработанное Wilkowski для горячекатаной и нормализованной стали категорий прочности до Х65 полностью соответствует реальному соотношению поглощенная энергия ИПГ -поглощенная энергия Шарпи-V высоковязких сталей термомеханической прокатки толщиной до 25 мм. При большей толщине стали ни одно из рассмотренных уравнений корреляции не отвечает реальному соотношению энергии ИПГ и энергии Шарпи-V. Для высоковязких сталей такой толщины при определении энергии остановки вязкой трещины методом ВТСМ целесообразно использовать реальные соотношения поглощенной энергии ИПГ и Шарпи-V или совершенствовать методику расчета в направлении непосредственного использования энергии ИПГ вместо энергии Шарпи-V, рассчитанной по уравнениям корреляции. **Практическая ценность.** Уточнены условия применения метода ВТСМ совместно с полуэмпирическими уравнениями корреляции поглощенной энергии Шарпи-V и ИПГ и реальными соотношениями этих показателей при определении энергии этих показателей при определении энергии остановки вязкой трещины в газопроводах из современных высоковязких сталей.

Ключевые слова: остановка вязкой трещины; полномасштабные испытания на разрыв; газопроводные трубы; метод двух кривых Batelle (ВТСМ); испытания падающим грузом (ИПГ); энергия Шарпи-V; энергия ИПГ; уравнения корреляции; категории прочности Х65, Х70, Х80; поглощенная энергия

CONTROL OF DUCTILE FRACTURE PROPAGATION IN MODERN GAS PIPELINES

VAKHRUSHEVA V.S.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech), Prof.*,
LUCHKOV A.D.², *Cand. Sc. (Phys.-Math.), Lead. Res. Fell.*,
PUSHKARENKO M.V.³, *Master*

^{1*} Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, Ukraine, tel. +38 (099) 388-67-94, e-mail: vs062@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

² State Enterprise “Research and Design-technology Institute of the Tube Industry Ya.Yu. Osada by name”, 1-a, Pissarzhevsky str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (097) 075-51-79

³ Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Establishment “Pridniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 035-14-27, e-mail: nikshustrii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6253-8637

Abstract. Problem statement. The control of destruction expansion is important aspect of exploitation safety supporting of the modern high-pressure gas pipelines. The technology of such control is most important for prevention extended ductile destruction of gas pipelines, that can make serious damage for economy and environment. The counterstand of running fracture extension is material property, which determine its ability of extended destruction arrest. The index of this ability is minimal absorbed energy of ductile fracture arrest, which is estimated by the results of full-sized burst tests. These tests are cumbersome and expensive enough. That is why Batelle Two Curv Method (BTCM) was proposed for definition running fracture arrest energy. In this test arrest energy is expressed by absorbed Charpy-V energy. BTCM was invented at the beginning of 70s XX century and it was successfully used for steels with strength categories before X65, which have low or medium ductility. After that new high-ductile tube steels appeared in the industry, which were made with thermomechanical rolling method. It was discovered, that for this steels immediate measurement Charpy-V energy is not reliable index of destruction arrest. That is why it was decided to determine Charpy-V energy by the value of absorbed DWTT energy with using equalizations of correlation Charpy-V energy and DWTT energy. The range of such equalizations is already known. However, as it was shown in the analysis, all of them have crucial issues and disadvantages, which need characterization of correct and effective using these equalizations for determination running ductile fracture arrest energy with BTCM method in high-ductile tube steels, which have different strengths and thickness. **Purpose.** The characterization of accordance absorbed energy Charpy-V and Drop Weight Tear Test (DWTT) correlation equalizations with real (experimental) correlation these indexes of researched high-ductile tube steels. **Material and methodology.** The high-ductile steels for gas pipelines, which have strength categories X80, X70, X65 and different thickness, were chosen as materials for research. Drop weight tear tests (DWTT) were realized with using Zwick firm vertical drop machine. Full-sized samples with pressured cut were assayed in automatic registration curves force-moving mode. Full absorbed energy of destruction, energy of fracture genesis and running were determined. The quantity of ductile component in full-sized DWTT samples was estimated in accordance with standard API RP5L3-96 (2007) and standard BSEN 10274:1999. Charpy-V energy was determined in accordance with standard ГОСТ 9454-78 on the samples type H. **Results.** It was gotten real (experimental) correlation of absorbed Charpy-V and DWTT energy in modern high-ductile tube steels, which are extensively used in gas pipelines building. **Scientific novelty.** It was analysed the modern condition of the problem with characterization destruction arrest in high-ductile tube steels for high-pressure gas-pipelines. It was shown, that Wilkowski linear equalization for hot-rolled and normalized steels with strength categories before X65 fully accords with real correlation absorbed DWTT energy-absorbed Charpy-V energy in high-ductile steels with thickness before 25 mm, which were treated with thermomechanical rolling. If the steel has big thickness, no one of considered correlation equalizations will not accord with real correlation DWTT energy and Charpy-V energy. It is necessary to use real correlation of absorbed DWTT energy and Charpy-V energy for high-ductile steels with such thickness or develop calculation methods to the way of immediate using DWTT energy instead of calculated with correlation equalizations Charpy-V energy. **Practical value.** It were specified the conditions of using BTCM method in accordance with half-empirical correlation equalizations of absorbed Charpy-V energy and DWTT energy, and real correlation of these variables during running ductile fracture arrest energy determination in gas pipelines, that are made from modern high-ductile steels.

Keywords: running ductile fracture arrest; full scale burst test, gas pipeline; Batelle Two Curv Method (BTCM); Drop Weight Tear Test (DWTT); Charpy-V energy; DWTT energy; equations of correlation; grade X65, X70, X80, absorbed energy

Вступ

Сучасний магістральний газопровід є оптимальним транспортним засобом, що забезпечує економічну доцільність передачі десятків і сотень мільярдів кубічних метрів природного газу на відстані близько тисяч кілометрів. В той же час, такий газопровід представляє потенційне джерело підвищеної техногенної небезпеки. Більшість аварій на газопроводах супроводжуються вибухами із займанням газу, що призводить до великих

матеріальних втрат у зв'язку з припиненням надходження газу, високою вартістю ремонтно-відновних робіт, викидами в атмосферу великої кількості двоокису вуглецю. Крім того, такі аварії часто супроводжуються знищенням лісу, пожежами з вигоранням ґрунту, який протягом багатьох років не відновлюється.

Таким чином, експлуатаційна надійність магістрального газопровідного транспорту істотним чином впливає на екологічну і енергетичну безпеку країн, що добувають і транспортують природний газ.

Лінійна частина магістральних трубопровідних систем більш ніж на 90 %, складається з труб і можна з упевненістю говорити, що надійність і працездатність таких систем визначається опором матеріалу труб руйнуванню.

Розвиток методів оцінки опору руйнуванню магістральних газопроводів

У 60-х роках минулого століття, для оцінки цього важливого показника, у зв'язку зі збільшенням частоти випадків виникнення протяжних руйнувань газопроводів, в Меморіальному інституті Battelle (США) був розроблений метод випробування металевих матеріалів на ударний розрив падаючим вантажем (ВПВ), прийнятий американським нафтовим інститутом (API) і введений як основний стандарт, що став міжнародним (API RP5L3) [1].

Цей стандарт діє і понині після ряду перевидань. На його основі створені національні стандарти BSEN1027 4 (Великобританія) [2] і ГОСТ 30456 (країни СНД) [3]. ВПВ ґрунтується на повному руйнуванні одним ударом бойка вантажу повнотовщинного зразка основного металу труби або листового прокату, що вільно падає, з концентратором деформації у вигляді гострого поперечного надрізу. В результаті такого випробування, що проводиться на спеціальних випробувальних машинах-копрах, визначають кількість в'язкої складової в зламі зруйнованого зразка (стандартизований показник) і/або поглинену енергію його руйнування. Проте цей показник до теперішнього часу не стандартизований.

К часу розробки і введення стандарту на ВПВ труби для магістральних газопроводів, виготовляли із звичайної гарячекатаної або нормалізованої сталі категорій міцності до Х65 з невисокою в'язкістю. На рубежі 60-х і 70-х років у світі почалося бурхливе зростання споживання природного газу, що обумовило значне збільшення його видобутку головним чином за рахунок введення нових родовищ, що знаходяться за тисячі кілометрів від місць споживання. Для такого збільшення об'єму і відстані прокачування газу необхідно було спорудити нові потужні високопродуктивні газотранспортні системи на робочий тиск 10...12 МПа з труб діаметром до 1 420 мм включно.

Для вирішення цього завдання необхідно було створити матеріали нового покоління, кардинально перевершуючи гарячекатані і нормалізовані сталі категорій міцності \leq Х65 за міцностими і особливо в'язкісними показниками. Були розроблені нові технологічні процеси виплавки низьковуглецевої, мікролегованої ніобієм і ванадієм сталі і процеси термомеханічної прокатки листів для газопровідних труб категорій Х65, Х80 і вище з в'язкістю Шарпі-В 350...400 Дж і більше. Незабаром було виявлено, що методика оцінки результатів ВПВ, використовувана в діючих стандартах [1-3], не враховує реальну структуру використання нових сталей і не забезпечує достовірність результатів випробувань за показником

кількості в'язкою складової. В той же час альтернативна оцінка опору в'язкому руйнуванню за показниками поглиненої енергії ВПВ [4-6] не може бути реалізована через відсутність нормативної бази для такої оцінки, як в плані методики випробування (діючі стандарти не містять методичних вказівок за визначенням енергетичних показників руйнування), так і вимог до величини поглиненої енергії ВПВ, що забезпечує зупинку в'язкої тріщини.

Необхідно помітити, що міжнародний стандарт на газопровідні труби ANSI/API специфікація 5ISO3183:2007 [7] містить додаток G «Труби PSL-2, стійкі до поширення в'язкої тріщини». У ньому приведені вимоги до мінімальних значень поглиненої енергії Шарпі – V для зупинки в'язкої тріщини в трубах категорій міцності від В до Х80 з товщиною стінки до 25,4 мм для газопроводів на робочий тиск до 8 МПа. Проте, критерій оцінки (поглинена енергія Шарпі), що вичерпав себе, і вказані обмеження не дозволяють оцінити стійкість проти протяжних в'язких руйнувань сучасних потужних магістральних газопроводів на тиск 10 МПа і вище, особливо при товщині стінок труб більше 25 мм, ВПВ яких часто дає негативні результати за показником кількості в'язкої складової. Падіння цього показника до значень нижче нормованих прийнято зв'язувати з деформаційним зміцненням металу при ударі бойка копра і відповідним зниженням його в'язкості [4-6]. Цей ефект тим значніше, чим вище в'язкість сталі і товщина прокату.

Неодноразово робилися спроби встановити вплив зміцнення металу при ударі бойка на кількість в'язкою складової в зламі зразків ВПВ високов'язкої сталі. Зменшували розрахункову площу поверхні руйнування за рахунок збільшення ділянки, що віднімалася, на якій локалізується пластична деформація, з 19 до 25 мм [4], наносили так звані "зворотні надрізи" різної довжини (надрізи на ударній стороні зразків, співосні з надрізом-концентратором), а також випробували зразки заздалегідь напружені розклинюванням зворотних надрізів [4; 6; 8].

Усі ці спроби виявилися безуспішними. Було досягнуто деяке зниження рівня поглиненої енергії зародження тріщини без істотної зміни енергії її поширення і кількості в'язкої складової в зламі. Був зроблений висновок, що для забезпечення оптимальних умов розвитку тріщини в зразках із зворотнім надрізом необхідно висоту зразка збільшити з 3 до 5 дюймів (127 мм) [8]. Перехід на такий зразок мав би означати необхідність повної заміни копрів ВПВ діючих випробувальних лабораторій на нові, істотно потужніші, що нереально.

Була висловлена думка [4] «Крихке руйнування зразків ВПВ на ділянці протилежній надрізу, яке спостерігається при випробуванні високов'язких матеріалів, що знижує кількість в'язкої складової у зламі, є результатом того, що сучасна практика

оцінки поверхні зламу не враховує можливість появи такого руйнування. А це може призвести до здвигу температури в'язко-крихкого періоду, якщо її вибір засновується на жорстких вимогах до доли зрізу SA (кількості в'язкої складової) рівній 85 %. Однак, діючі стандарти не враховують це явище». Автори [4] вважають: «Повинна бути знайдена коректна методика врахування ефекту появи крихкого руйнування зразків ВПВ на ділянці протилежній надрізу. Необхідно пам'ятати, що доля зрізу SA % це тільки якісний параметр, і що ВПВ є методом визначення в'язко-крихкого переходу. Значення цього параметру має бути перевірено за допомогою формування температурної залежності поглиненої енергії ВПВ для оцінки фактичного переходу в крихкий стан випробуваних сталей».

Повномасштабні випробування на зупинку тріщини громіздкі, трудомісткі і досить дорогі. Крім того, будучи єдиним ефективним способом безпосереднього визначення в'язкості металу труб, що забезпечує безпечну експлуатацію трубопроводів, такі випробування не є засобом виробничого контролю труб і листів. У зв'язку з цим отримали розвиток напівемпіричні методи прогнозування зупинки тріщини. Серед таких методів найбільш надійним і фізично обгрунтованим вважається метод двох кривих Battelle (BTCM). Метод полягає в оцінці зміни швидкості руйнування газопровода при тиску вище тиску зупинки тріщини. BTCM розглядає газову декомпресію (ведуча крива) і динамічний опір поширенню тріщини (крива опору руйнуванню) як непов'язані між собою процеси, конкуренція яких визначає швидкість поширення тріщини. Крива декомпресії газу визначається кодом GASDEKOM, розробленим інститутом Battelle, який застосовується до широкого кола складів газу. Крива опору руйнуванню розраховується по наступній напівемпіричній формулі:

$$V_f = C \frac{\sigma_f}{\sqrt{R}} \left(\frac{P}{P_a} - 1 \right)^{1/6} \quad (1)$$

де V_f – швидкість поширення тріщини, м/с; C – параметр, що залежить від способу укладки труб; $\sigma_f = \sigma_v + 69$ МПа – напруження плинності, МПа; $R = CV/A_c$ – опір руйнуванню; CV – поглинена енергія повнорозмірних зразків Шарпі-V за верхнім значенням, Дж; A_c – площа поперечного перерізу зразка Шарпі, мм; P – миттєвий тиск декомпресії у вершини тріщини, МПа;

$P_a = \frac{2\sigma_a}{D}$ – тиск зупинки біля вершини тріщини, МПа; σ_a – кільцева напруга зупинки, МПа.

$$\sigma_a = \left(\frac{2\sigma_{1f}}{3,33\pi} \right) \arccos \left[\exp \left(- \frac{\pi RE}{24[\sigma_f]^2 2\sqrt{D}} \right) \right]$$

$$\sigma_a = \left(\frac{2\sigma_f}{3,33\pi} \right) \arccos \left[\exp \left(- \frac{\pi RE}{24\sigma_f^2 \sqrt{Dt/2}} \right) \right] \quad (2)$$

де E – модуль пружності, ГПа; D – діаметр труби, мм; t – товщина стінки труби, мм.

Рівняння 2 було розроблено з використанням елементарних методів механіки руйнування. Воно припускає існування лінійної залежності між енергією Шарпі-V (CVN), віднесеною до одиниці площі A_c , і в'язкістю руйнування G (вивільненою енергією деформації) [20]:

$$G = K_{1c}^2/E = 12 \frac{CVN}{A_c} \quad (3)$$

Метод двох кривих Batelle вимагає визначення швидкості руйнування при значеннях тиску, що перевершують тиск зупинки тріщини. За цієї умови ведуча крива і крива опору можуть бути зіставлені і їх відносне положення визначить можливість поширення руйнування або його зупинку, як це ілюструє рисунок 1.

Рисунок 1 містить криву декомпресії газу (крива DC) і криві опору руйнуванню (криві RC1, RC2 і RC3), що відповідають значенням в'язкості Шарпі-V сталі, що зростає від RC₁ до RC₃. Якщо значення в'язкості сталі досить високі і криві декомпресії і опору руйнуванню не перетинаються (крива RC₃) швидкість декомпресії вище швидкості тріщини на усіх рівнях тиску і тріщина зупиняється. Якщо крива декомпресії і крива опору руйнуванню перетинаються (крива RC₁), то поширення тріщини безперервно триватиме в області значень RC, для яких швидкість декомпресії виявляється нижче швидкості тріщини. Мінімальне значення в'язкості, що забезпечує зупинку тріщини (енергія Шарпі-V зупинки) відповідає точці дотику кривих DC і RC₂.

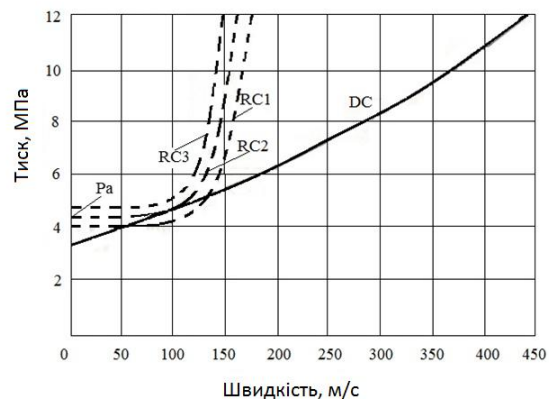


Рис.1. Метод 2-х кривих Batelle /
Fig.1. Batelle Two Curv Method (BTCM)

Таким чином, метод двох кривих Batelle дозволяє оцінити в'язкість, необхідну для повної зупинки продольної тріщини, що рухається, виражаючи її

через поглинену енергію Шарпі-V, що цілком відповідало реальній в'язкості сталей 60-х і 70-х років минулого століття. Проте, як було встановлено пізніше [9; 12], опір руйнуванню сучасних високов'язких сталей не може бути точно визначений за величиною поглиненої енергії Шарпі-V через розмірну невідповідність умов поширення тріщини в зразках Шарпі-V і реальних трубах. Для цього більше підходять полнотовщинні зразки ВПВ. Було показано [13] що подія зупинка/поширення тріщини може бути прогнозованою, якщо в методі двох кривих Battelle використати енергію Шарпі-V, обчислену за величиною поглиненої енергії ВПВ за допомогою рівнянь кореляції енергії ВПВ, енергії Шарпі-V, з яких найбільш обґрунтовані розглянуті нижче.

Лінійне рівняння Wilkowski

Wilkowski із співавторами [14] з інституту Batelle у кінці 70-х років розробили рівняння з лінійною кореляцією між питомою ВПВ (DWTТ) енергією зразків із стандартним пресованим надрізом і питомою енергією Шарпі-V (CVN) для звичайної гарячекатаної і нормалізованої сталі.

$$\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ} = 3 \left(\frac{E}{A}\right)_{CVN} + 300, \tag{4}$$

де E – загальна енергія руйнування, фт-фнт; A – площа руйнування зразка, кв. д.; E/A – питома енергія руйнування, фт-фнт/кв. д.

Коли мінімальна енергія Шарпі-V (CVN), що відповідає в'язкості зупинки передбачена за допомогою ВТСМ, мінімальна енергія зупинки ВПВ (DWTТ) може бути визначена за рівнянням 3. Після нескладного перетворення рівняння 3 дозволяє вирішити зворотне завдання: за енергією зупинки ВПВ (DWTТ) визначити мінімальну енергію зупинки Шарпі-V (CVN).

Рівняння Wilkowski 2000

Для того щоб показати нелінійну кореляцію між енергією DWTТ (ВПВ) і енергією CVN (Шарпі-V), характерну для високов'язких сталей категорії ≥X65, Wilkowski [15] запропонував нове рівняння:

$$\left(\frac{E}{A}\right)_{CVN(w2000)} = \frac{175}{3} \left[1,3 \left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ} \right]^{0,385} - 600 \tag{5}$$

де $\left(\frac{E}{A}\right)_{CVN(w2000)}$ – питома енергія і константа, які виражені в фт.-фнт. / кв. д;

$\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ}$ $\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ}$ $\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ}$ – загальна питома енергія DWTТ (ВПВ);

$\left(\frac{E}{A}\right)_{CVN(w2000)}$ $\left(\frac{E}{A}\right)_{CVN(w2000)}$ – загальна питома енергія CVN (Шарпі-V).

Рівняння дозволяє визначити необхідну енергію зупинки DWTТ (ВПВ) при мінімальній CVN (Шарпі-V) енергії, передбаченої за допомогою

ВТСМ. Це рівняння, вирішене відносно $\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ}$ $\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ}$, дає значення CVN (Шарпі-V) енергії зупинки за експериментально виміряною величиною DWTТ (ВПВ) енергії.

Рівняння Kawaguchi

Kawaguchi і співавтори [16] розглянули можливість використання рівняння Wilkowski 2000 стосовно трубопровідної сталі X80. Вони виявили, що рівняння (5) не відповідає їх даним випробування цієї сталі, оскільки це рівняння ґрунтувалося на результатах випробування сталей категорії ≤ X70. Вони запропонували наступне рівняння для співвідношення питомої енергії CVN (Шарпі-V) і питомої енергії DWTТ (ВПВ) :

$$\left(\frac{E}{A}\right)_{CVN} = 0,3144 \left[\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ} \right]^{0,9562} - 100$$

$$\left(\frac{E}{A}\right)_{CVN} = 0,3144 \left[\left(\frac{E}{A}\right)_{DWTТ} \right]^{0,9562} - 100 \left(\frac{E}{A}\right)_{CVN} \tag{6}$$

Це рівняння лінійне, оскільки показник ступеня 0,963 близький до одиниці.

Модель HLP

У кінці 70-х років паралельно с інститутом Batelle велика дослідницька робота проводилася японським комітетом по високоміцним трубним сталям HLP. Була розроблена їх власна модель кореляції енергії зупинки DWTТ (ВПВ) і CVN (Шарпі-V) [18–19]. Запропоновано рівняння виду:

$$D_p = 3,29 t^{1,5} C_v^{0,544} \tag{7}$$

де D_p – повна поглинута енергія DWTТ (ВПВ), Дж; C_v – повна поглинута енергія CVN (Шарпі-V), Дж; t – товщина прокату / стінки труби, мм.

Як стверджують автори, це співвідношення розроблено на основі результатів випробувань трубопроводів різних категорій міцності і товщини стінки. Усі розглянуті рівняння кореляції мають свої обмеження і недоліки. Так, лінійне рівняння Wilkowski (рівняння 4) застосовано тільки до газопровідних сталей категорій міцності ≤ X65. Рівняння Wilkowski 2000 (рівняння 5) не може бути

використане стосовно високов'язких сталей категорій > X70 [16]. Це рівняння дає нелінійну залежність з відхиленнями від лінійності в напрямі, протилежному реально спостережуваному (крива загинається вгору). Автори [16] ставлять питання про практичну корисність рівняння Wilkowski 2000. Рівняння Kawaguchi (рівняння 6) з вказаної вище причини так само не показує реальну нелінійність співвідношення енергії ВПВ і Шарпі-V. Модель HLP. Рівняння 6 було отримано на основі даних повномасштабних випробувань на розрив труб із сталі X70. З цієї причини в [19] висловлений сумнів з приводу точності розрахунків за рівнянням 6 стосовно високов'язких трубопровідних сталей вищих категорій міцності. Характерну для

високов'язких трубних сталей нелінійність співвідношення питома енергія ВПВ – питома енергія Шарпі-V, ілюструє рисунок 2, запозичений у Demotonti [19]. Добре видно, що відхилення від лінійності спостерігається вже при значеннях енергії Шарпі-V близько 150 Дж/см².

Розглянуті вище обмеження, протиріччя і неоднозначність оцінки корисності деяких рівнів кореляції в розрахунку по методу VTSM вказують на необхідність встановлення відповідності між розрахунковими і реальними, отриманими експериментально, співвідношеннями поглиненої енергії ВПВ і енергії Шарпі-V і вибору на цій основі методики контролю умов зупинки в'язкої тріщини в магістральний газопровід.

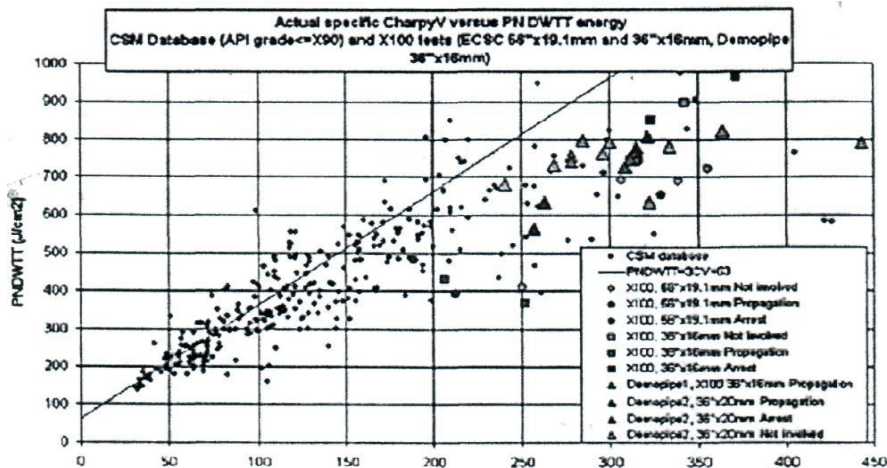


Рис. 2. Співвідношення питомої енергії Шарпі і питомої енергії ВПВ сучасних трубопровідних сталей / Fig. 2. Correlation of specific Charpy-V energy and specific DWTT energy in modern gas pipeline steels

Оцінка відповідності рівнянь кореляції реальним співвідношенням енергія ВПВ - енергія Шарпі-V високов'язких трубних сталей

З метою встановлення відповідності між розрахунковими і реальними співвідношеннями

енергії ВПВ і енергії Шарпі-V були досліджені високов'язкі сталі термомеханічного прокату різної товщини, які широко використовуються у виробництві труб для магістральних трубопроводів. Основні характеристики досліджуваних сталей приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні характеристики досліджень високов'язких трубних сталей / Main characteristics of high-ductile tube steels researches

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

Дослідження проводили на інструментальних копрах фірми Zwick з максимальною енергією 60 і 100 кілоджоулів відповідно до вимог стандарту

APIRP5L3 [1]. Випробували стандартні зразки з пресованим надрізом по два зразки на точку. Враховували середні значення з двох вимірів.

З метою отримання досить широкого набору значень енергії ВПВ і Шарпі-V зразки випробовували при температурах +20, 0, -20, -40; -60 і -80 °С. Перед початком випробувань були проведені спеціальні дослідження, що дозволили оптимізувати процес ВПВ за показником запасеної енергії копра і підвищити точність вимірювання як фрактографічних так і енергетичних показників. Результати дослідження представлені на рисунку 3. Добре видно тенденцію до відхилення одиничних значень енергії ВПВ від лінійного співвідношення з енергією Шарпі-V. Рисунок 3 так само як і рисунок 2 дає загальне уявлення о співвідношенні питомої енергії ВПВ і енергії Шарпі-V високов'язких трубних сталей безвідносно до їх категорії міцності та товщини, що утруднює оцінку впливу цих факторів.

Нижче, на рисунках 4-6, для кожної категорії міцності і товщини досліджених сталей представлені співвідношення повної поглиненої енергії ВПВ і Шарпі-V, отримані експериментально (точки) і

розраховані по рівняннях кореляції Wilkowski (рівняння 4, 5 і криві 1, 2 відповідно), Kawaguchi (рівняння 6, крива 3) і HLP (рівняння 7, крива 4).

Рис. 4 а. Сталь X80 завтовшки 17,5 мм. Експериментальні точки задовольняють тільки лінійному співвідношенню енергії ВПВ і Шарпі-V Wilkowski (пряма 1).

Рис. 4 б. Сталь X80 завтовшки 27,7 мм. Положення експериментальних точок не задовольняє жодному з даних рівнянь кореляції.

Рис. 5 а. Сталь X70 завтовшки 21,6 мм. Експериментальні точки, також як і на рисунку 4 а для сталі 80X, повністю відповідають лінійному співвідношенню енергії ВПВ Wilkowski.

Рис. 5 б, в. Сталь X70 завтовшки, відповідно, 25,8 і 32,6 мм, а також рис. 6, сталь X65 завтовшки 39,0 мм. Реальні співвідношення енергії ВПВ та Шарпі-V не відповідають розрахунковим, отриманим за допомогою розглянутих рівнянь кореляції.

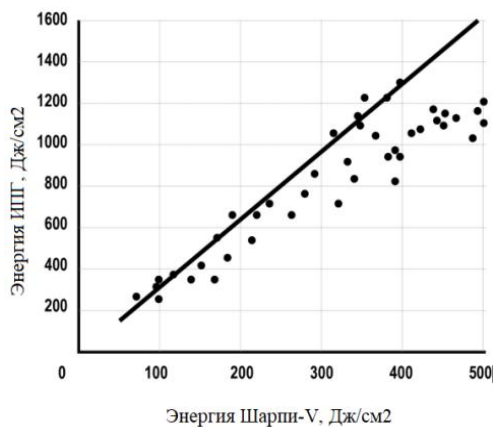


Рис. 3. Реальне співвідношення питомої енергії Шарпі-V і питомої енергії ВПВ, досліджених сталей (точки) і лінійне співвідношення Wilkowski (пряма) / Fig. 3. Real correlations of specific Charpy-V energy and specific DWT energy, explored steels (points) and linear Wilkowski correlation (straight line)

Таким чином, проведені випробування показали, що надійна оцінка енергії зупинки в'язкої тріщини в магістральних газопроводах з високов'язких сталей

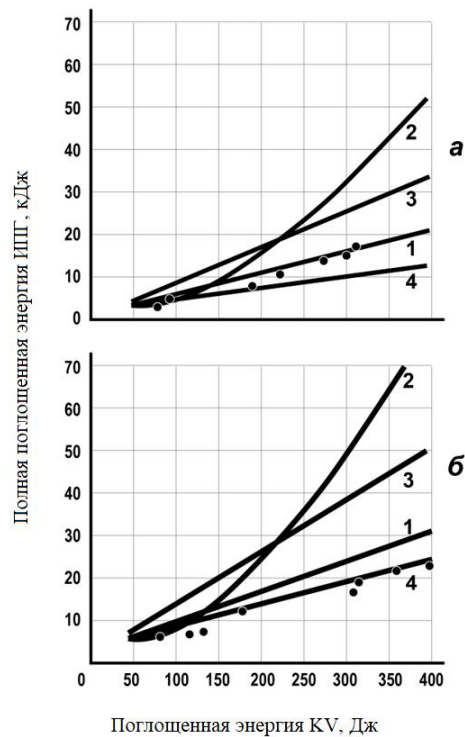


Рис. 4. Реальне співвідношення повної поглиненої енергії ВПВ і енергії Шарпі-V (точки) і розраховані за рівняннями кореляції Wilkowski лінійна кореляція(1), Wilkowski 2000 (2), Kawaguchi (3) і HLP (4): а – сталь X80 завтовшки 17,5мм; б – сталь X80 завтовшки 27,7мм / Fig.4. Real correlations of full absorbed DWT energy and Charpy-V energy (points) and calculated with linear equations Wilkowski linear correlation (1), Wilkowski 2000 (3), Kawaguchi (3), and HLP (4): а – steel X80 with 17, 5 mm thickness, б – steel X80 with 27,7 mm

товщиною більше 25 мм методом ВТСМ у поєднанні з відомими рівняннями кореляції енергії ВПВ і Шарпі-V нереальна. Для визначення енергії зупинки

в'язкої тріщини у сучасних високов'язких трубних сталях такої товщини необхідно використовувати реальне співвідношення енергії ВПВ і Шарпі-V або удосконалити методику ВТСМ з метою безпосереднього використання енергетичних показників ВПВ замість енергії Шарпі-V, яка визначається за рівняннями кореляції.

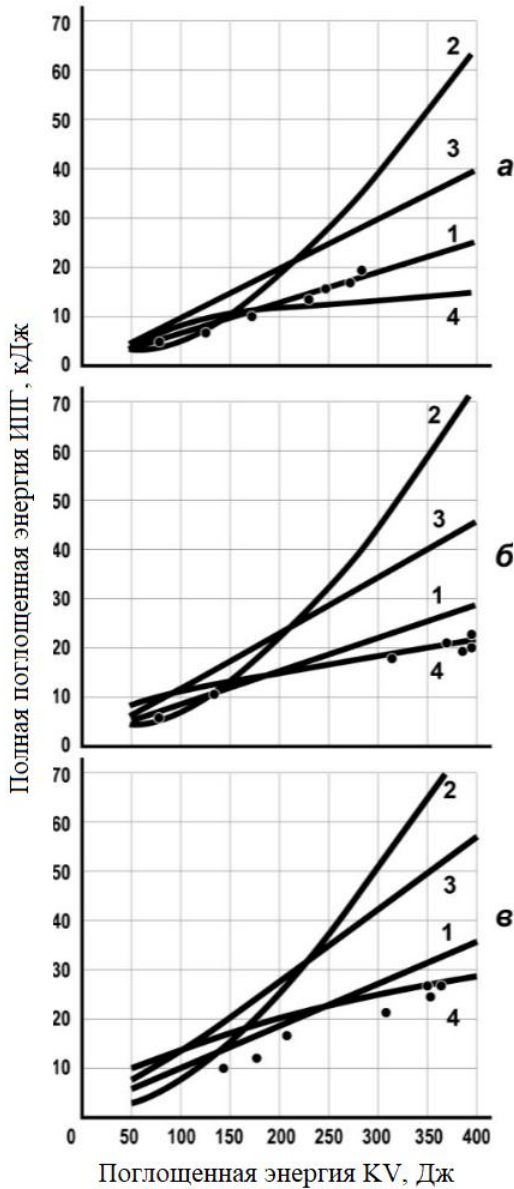


Рис. 5. Реальне співвідношення повної поглиненої енергії ВПВ і енергії Шарпі-V (точки) і розраховані по рівнянням кореляції Wilkowski лінійна кореляція(1), Wilkowski 2000 (2), Kawaguchi (3) і HLP (4) : а – сталь X70 завтовжки 21,6 мм; б – сталь X70 завтовжки 25,8мм; в – сталь X70 завтовжки 32,6мм / Fig. 5. Real correlations of full absorbed DWTT energy and Charpy-V energy (points) and calculated with linear equations Wilkowski linear correlation (1), Wilkowski 2000 (3), Kawaguchi (3), and HLP (4): a – steel X70 with 21,6 mm thickness, b – steel X70 with 25,8 mm thickness; c – steel X70 with 32,6 mm thickness

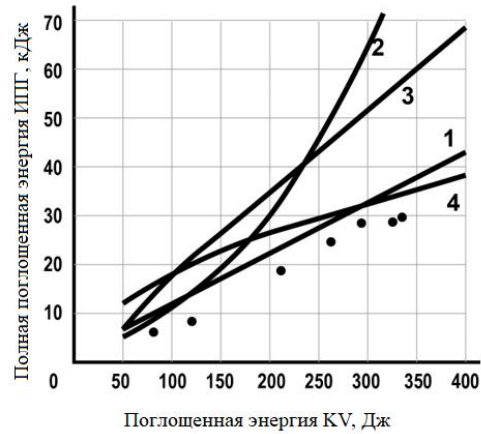


Рис. 6. Реальне співвідношення повної поглиненої енергії ВПВ і енергії Шарпі-V (точки) і розраховані по рівнянням кореляції Wilkowski лінійна кореляція(1), Wilkowski 2000 (2), Kawaguchi (3) і HLP (4) / Fig. 6. Real correlations of full absorbed DWTT energy and Charpy-V energy (points) and calculated with linear equations Wilkowski linear correlation (1), Wilkowski 2000 (3), Kawaguchi (3) and HLP (4)

Висновки

Проаналізовано сучасний стан проблеми прогнозування зупинки в'язкого руйнування магістральних газопроводів з сучасних трубних сталей, ґрунтованого на методі двох кривих Battelle у поєднанні з випробуванням падаючим вантажем (ВПВ) матеріалу трубопроводів і рівнянь кореляції енергії ВПВ і Шарпі-V.

Оцінена відповідність рівнянь кореляції поглиненої енергії ВПВ і Шарпі-V реальним співвідношенням цих показників високов'язких трубних сталей категорій X65, X70 і X80 різної товщини. Показано, що відповідність розрахункових співвідношень реальним співвідношенням має місце тільки для лінійного рівняння Wilkowski при товщині сталі до 25 мм. При більшій товщині сталі жодне з розглянутих рівнянь не відповідає реальним співвідношенням енергії ВПВ і Шарпі-V.

Для оцінки енергії зупинки в'язкої тріщини у вказаних сталях товщиною більше 25 мм слід удосконалити методику у напрямі безпосереднього використання в розрахунках за методом двох кривих Battelle поглиненої енергії ВПВ замість енергії Шарпі-V, розрахованої за допомогою рівнянь кореляції або користуватися реальними співвідношеннями енергії ВПВ і Шарпі-V.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

18. Стандарт API RP5L3-96. Трубы магистральные. Рекомендуемый метод проведения испытаний на ударный разрыв падающим грузом. – 2007. – 98 с.
19. Стандарт BSEN10274:1999. Материалы с металлическими свойствами. Испытание падающим грузом. – 1999. – 87 с.
20. ГОСТ 30456-97 Металлопродукция. Прокат листовой и трубы стальные. Методы испытания на ударный изгиб. – 2006. – 85 с.
21. Halsen K. O. Drop Weight Tear Testing of a High-Toughness Linepipe. Material / K. O. Halsen, D. N. Veritas // Proceedings of IPC 2004 International Pipeline Conference (October 4-8, 2004). – Calgary, Alberta, Canada. – 2004. – Pp. 24-29.
22. Оценка остановки распространения разрушения в стальных трубах X100, полученных по технологии ТМКО, для газопроводов высокого давления / [Дж. Демонфони, Дж. Маннуччи и др.] // Современные стали для газонефтепроводных труб. Проблемы и перспективы : междунар. сем. – Москва. – 2006. – 22 с.
23. Hwang B. Analysis of Inverse Fracture Occuring in Hammer-Impacted Region during Drop-Weight Tear Test of a High-Toughness Linepipe Steel / B. Hwang, S. Lee, Y. M. Kim, J. Nack // Proceedings of the Thirteen Int. Offshore and Polar engineering Conference. – 2003. – Pp. 34-38.
24. Стандарт ANS / API спецификация 5L/ISO 3183:2007. Спецификация на магистральные трубы.
25. Wilkowski G. Evaluation of Fracture Speed on Ductile Fracture Resistance / G. Wilkowski, D. J. Shim, F. W. Brust // International Conference on Pipeline. – Ostende, Belgium. – October 12-14, 2009. – Pp. 51-56.
26. Cosham A. Don't drop the drop-weight tear test / A. Cosham, D. J. Jones, R. Eiber, Dr.P. Hopkins // The Journal of Pipeline Engineering. – Vol. 9, №. 2, June 2010. – Pp. 69-85.
27. Zhu X.-K. Ductile-fracture arrest methods for gas – transmission pipelines using / X.-K. Zhu, B. N. Leis // Charpy impact energy or DWTT energy. – Journal of Pipeline Engineering. – Vol. 12, № 3. – 2013. – Pp. 17-23.
28. Maxey W. A. Ductile fracture initiation propagation and arrest in cylindrical vessels / W. A. Maxey, J. F. Kiefner, R. J. Eiber, A. R. Duffy // Fracture toughness. – ASTM STR514. – Part 2. – 1972. – Pp. 347-362.
29. Mannucci G. Control of Ductile Fracture Propagation in X80 Gas Linepipe / G. Mannucci, G. Demofonti // The Journal of Pipeline Engineering. – 3^d Quarter, 2011. – Pp. 27-32.
30. Wilkowski G. M. Use ode a Brittle Notch DWTT Specimen to Predict Fracture Characteristics of Line Pipe Steels, presented at the ASME / G. M. Wilkowski, W. A. Maxey, R. J. Eiber. – 1977. – Energy Technology Conference. – Houston, Texas. – Paper 11-Pet-21. – September 18-22. – 1977. – Pp. 45-49.
31. Wilkowski G. Fracture propagation toughness measurements / G. Wilkowski // Proceedings of the 6th Symposium on Line Pipe Research. Paper. – Houston, USA. – 1979. – Pp. 62-69.
32. Wilkowski G. Effect of drade on ductile fracture arrest criteria for gas pipelines / G. Wilkowski, D. L. Rudland, H. Xu, N. Sanderson // Proceedings of the International Pipeline Conference. – Canada. – Paper IPC 006-10350. – 2006. – Pp. 62-69
33. Kawaguchi S. Application of X80 in Japan : fracture control / S. Kawaguchi and oth. // Proceedings of the 4th International Conference on Pipeline Technology. – Ostand, Belgium. – 2004. – Pp. 17-20.
34. Makino H. Simulation method foe crack propogation and arrest of shear fracture in natural gas transmission pipelines / H. Makino, T. Inoue, T. Kubo, T. Matsumoto // Pipe Dreamer's conference. – Yokohama Japan. – November 7-8. – 2002. – Pp. 31-35.
35. Makino H. Fracture arrest ability of high pressure gas transmission pipelines by sigh strength pipelines / H. Makino, I. Takeuchi, R. Higuchi // Proceedings of the Pipeline Technology Conference. – Ostend, Belgium. – 2009. – Pp. 73-77.
36. Demofonti G. Existing methods for the evaluation of material fracture resistance for high grade steel pipeline / G. Demofonti, G. Mannuchi, P. Roovers // Joint Technical Meeting. – Canberra. – 16-19th. – April, 2007. – Pp. 22-36.

REFERENCES

1. Standard API RP5L3-96. *Truby magistral'nye. Rekomendovanniy metod ispytaniya na udarnyj razryv padauschim gruzom trub dlya magistral'nyh truboprovodov* [Magistral pipelines. Recommended method of drop weight tear test]. 2007, 96 p. (in Russian).
2. Standard BSEN10274:1999. *Materialy s metallicheslimi svojstvami. Ispytaniya padauschim gruzom* [Materials with metal properties. Drop weight tear test]. 1999, 87 p. (in Russian).
3. GOST 30456-97 *Metalloprodukcija. Prokat listovoj i truby stal'nye. Metody ispytaniya na udarnyi izgib* [Metal products. Mill products and steel tubes. Methods of blow-bending test]. 2006, 85 p. (in Russian).
4. Halsen K.O. and Veritas D.N. Drop Weight Tear Testing of a High-Toughness Linepipe Material. Proceedings of IPC 2004. International Pipeline Conference, October 4-8, 2004, Calgary, Alberta, Canada, pp. 24-29.
5. Demofonti G. and Mannuchi G. *Ocenka ostanovki rasprostraneniya razrusheniya v stalnyh trubah X100, poluchenyh po tehnologij TMKO, dlya gazoprovodov vysokogo davleniya* [Characterization of destruction stopping in the steel tubes X100 that are got with TMKO technology for high-pressure gas pipelines]. *Sovremennye stali dlya gazonefteprovodnyh trub* [Modern steels for tubes of gas pipelines. Problems and horizons]. International seminar, Moscow, 2006, 22 p. (in Russian).
6. Hwang B., Lee S., Kim Y.M. and Nack J. Analysis of Inverse Fracture Occuring in Hammer-Impacted Region during Drop-Weight Tear Test of a High-Toughness Linepipe Steel. Proceedings of the Thirteen International Offshore and Polar engineering Conference, 2003, pp. 34-38.
7. Standard ANS/API, specification 5L/ISO 3183:2007. *Specifikacija dlya magistral'nyh trub* [Specification for magistral tubes]. (in Russian).
8. Wilkowski G., Shim D.J. and Brust F.W. Evaluation of Fracture Speed on Ductile Fracture Resistance, International

Conference on Pipeline, Ostende, Belgium, October 12–14, 2009, pp. 51–56.

9. Cosham A., Jones D.J., Eiber R. and Hopk P. Don't drop the drop-weight tear test. The Journal of Pipeline Engineering, vol. 9, no. 2, June 2010, pp. 69–85.

10. Zhu X.-K. and Leis B.N. Ductile-fracture arrest methods for gas – transmission pipelines using Charpy impact energy or DWTT energy. Journal of Pipeline Engineering, vol. 12, no. 3, 2013, pp. 17–23.

11. Maxey W.A., Kiefner J.F., Eiber R.J. and Duffy A.R. Ductile fracture initiation propagation and arrest in cylindrical vessels. Fracture toughness, ASTM STR514, part 2, 1972, pp. 347–362.

12. Mannucci G. and Demofonti G. Control of Ductile Fracture Propagation in X80 Gas Linepipe. The Journal of Pipeline Engineering, 3^d Quarter, 2011, pp. 27–32.

13. Wilkowski G.M., Maxey W.A. and Eiber R.J. Use of a Brittle Notch DWTT Specimen to Predict Fracture Characteristics of Line Pipe Steels, presented at the ASME, 1977, Energy Technology Conference, Houston, Texas, Paper 11–Pet–21, September 18–22, 1977, pp. 45–49.

14. Wilkowski G. Fracture propagation toughness measurements. Proceedings of the 6th Symposium on Line Pipe Research. Paper K., Houston, USA, 1979, pp. 62–69.

15. Wilkowski G., Rudland D.L., Xu H. and Sanderson N. Effect of grade on ductile fracture arrest criteria for gas pipelines. Proceedings of the International Pipeline Conference, Canada, Paper IPC 006–10350, 2006, pp. 62–69.

16. Kawaguchi S. and oth. Application of X80 in Japan : fracture control. Proceedings of the 4th International Conference on Pipeline Technology, Ostand, Belgium, 2004, pp. 17–20.

17. Makino H., Inoue T., Kubo T. and Matsumoto T. Simulation method for crack propagation and arrest of shear fracture in natural gas transmission pipelines. Pipe Dreamer's conference. Yokohama Japan, November 7–8, 2002, pp. 31–35.

18. Makino H., Takeuchi I. and Higuchi R. Fracture arrest ability of high pressure gas transmission pipelines by high strength pipelines. Proceedings of the Pipeline Technology Conference, Ostend, Belgium, 2009, pp. 73–77.

19. Demofonti G., Mannucci G. and Roovers P. Existing methods for the evaluation of material fracture resistance for high grade steel pipeline. Joint Technical Meeting, Canberra, 16–19th April, 2007, pp. 22–36.

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. Д. В. Лаухінім (Україна), д-ром техн. наук, проф. Г. Д. Сухомлінім (Україна).

Надійшла до редакції 04.04.2019.

Прийнята до друку 08.04.2019.