

Перспективи підвищення надійності газонафтопроводів удосконаленням трубних сталей

© **Макаренко В.Д.**

д-р техн. наук

Винников Ю.Л.

д-р техн. наук

Харченко М.О.

канд. техн. наук

Дмитренко В.І.

канд. техн. наук

Національний університет

«Полтавська політехніка

ім. Юрія Кондратюка»

УДК 621.643:622.69

UA

Наведено шляхи підвищення експлуатаційної надійності газонафтопроводів удосконаленням трубних сталей. До них належать як суто металургійні, так і зварювально-технологічні. Однак будівництво потужних газопроводів вимагає удосконалення в'язко-пластичних, корозійностійких і холодостійких характеристик сталей. Наведено перспективу розвитку металургійної та трубопрокатної галузей з удосконалення трубних сталей, які широко застосовують у нафтогазовій промисловості України.

Ключові слова: нафтогазопроводи, трубна сталь, корозія, зварювання, контрольована прокатка, термічне покращення, домішки, міцність, в'язкість, холодостійкість.

RU

Приведены пути повышения эксплуатационной надежности газонефтепроводов усовершенствованием трубных сталей. К ним относятся как чисто металлургические, так и сварочно-технологические. Однако строительство мощных газопроводов требует усовершенствования вязко-пластичных, коррозионностойких и холодостойких характеристик сталей. Изложена перспектива развития металлургической и трубопрокатной отраслей по усовершенствованию трубных сталей, которые широко применяются в нефтегазовой промышленности Украины.

Ключевые слова: нефтегазопроводы, трубная сталь, коррозия, сварка, контролируемая прокатка, термическое улучшение, примеси, прочность, вязкость, холодостойкость.

EN

The ways of improving the operational reliability of gas pipelines by improving pipe steel are given. These include both purely metallurgical and welding-technological. However, the construction of high capacity gas pipelines requires the improvement of viscous-plastic, corrosion-resistant and cold-resistant characteristics of steels. The prospect of development of the metallurgical and pipe-rolling industries for the improvement of tubular steels, which are widely used in the oil and gas industry of Ukraine, is presented.

Key words: oil and gas pipelines, tubular steel, corrosion, welding, controlled rolling, thermal improvement, impurities, strength, viscosity, cold resistance.

Жорсткі вимоги до забезпечення працездатності трубопроводів потребують не лише великих витрат металу для виробництва труб, але й використання з цією метою сталей із занадто високими властивостями [1–6, 12–17]. Через це під час розроблення сталі для труб разом із вимогами високої надійності в експлуатації стоїть питання забезпечення їхньої мінімальної вартості за висо-

кої міцності, в'язкості та холодостійкості, що дасть змогу максимально знизити металоемність газонафтопроводів [13].

У сучасний період стрімко зросли вимоги до міцності трубної сталі (від 480–500 до 600–700 МПа) за одночасного підвищення її в'язкості та зварюваності у трасових (польових) умовах. Вимоги до ударної в'язкості металу труб із факультативних значень

0,5 МДж/м² на стандартних зразках із круглим надрізом (Менаже) підвищилися до 0,8–1,2 МДж/м² на зразках із гострим надрізом (Шарпі) [5–9]. Все це викликало інтенсивний розвиток наукових досліджень у металургійній і трубопрокатній галузях промисловості.

Вирішити поставлені завдання на базі звичайних низьколегованих нормалізованих сталей вже не видається можливим, адже за такого виробництва підвищення міцності сталі неминуче призводить до зниження її в'язкості й погіршення зварюваності [10, 12, 13].

За останні 20–25 років на низці заводів України (аналогічна робота проводилася і в країнах із розвинутою нафтогазовою галузю та металургійною промисловістю – Канаді, США, Німеччині) було організовано виробництво нового типу малоперлітних і безперлітних сталей, які отримують методом контрольованої прокатки [9]. Високі властивості цього типу сталей досягаються за мінімального легування (мікролегування карбонітридними елементами) за рахунок максимального роздріблення її структури під час прокатки та контрольованого охолодження. Підвищення пластичності й в'язкості сталі забезпечується завдяки формуванню однорідної структури та субструктури, невисокому вмісту шкідливих домішок, зниженню рівня локальних внутрішніх напружень. Досягнення металургів у цьому напрямі можна показати на прикладі зниження вмісту сірки в металі з 0,04 до 0,002–0,006%, бала зерна – з 7–8 номера до 12–14 [7]. Фізична суть нового типу сталі для труб полягає у формуванні якомога більш однорідної та дисперсної структури. Такий тип сталі можливо отримати шляхом використання різних режимів контрольованої прокатки чи термічного покращення [12, 15–17].

Процес контрольованої прокатки дає змогу отримувати листові сталі, мікролеговані карбонітридами, з найбільш високим комплексом властивостей шляхом надання їй особливої структури. З цією метою прокатку здійснюють за спеціально розробленою програмою, заснованою на оптимальній комбінації температури металу та величини пружної деформації (обтиску) сталі за умов виділення карбонітридів, які забезпечують отримання заданої структури [13].

Для ефективного здійснення контрольо-

ваної прокатки хімічний склад сталі повинен бути вибраний відповідно до кількості основних легуючих елементів – вуглецю, марганцю, кремнію, а також мікролегуючих домішок – ванадію, ніобію, нікелю, молібдену та ін. Сталь повинна бути досить повно очищена від шкідливих домішок, насамперед від сірки; оброблена рідкоземельними елементами (наприклад, церієм) для того, щоб виключити утворення витягнутих стрічкових і голчатих домішок [9, 16].

Загалом під час контрольованої прокатки, програмуючи виділення карбонітридної фази в процесі гарячого деформування, отримують сталь із найбільш високими показниками міцності, в'язкості та холодостійкості за мінімального легування. Для подальшого підвищення властивостей сталі після закінчення циклу контрольованої прокатки в інтервалі температур від 800–700 до 500–400 °С здійснюють прискорене регульоване охолодження в спеціальних установках [11]. Ця операція дає змогу завершити структурні перетворення в потрібному напрямі, додатково підвищити міцність сталі практично без зниження характеристик в'язкості та холодостійкості.

Поєднання високого ступеня очистки сталі від шкідливих домішок, її мікролегування карбідоутворюючими елементами з процесами безперервної розливки, контрольованої прокатки та прискореного регульованого охолодження дало можливість отримати особливо якісну сталь для виробництва труб за мінімальної витрати дорогих і дефіцитних легуючих елементів [11–13].

Зростання потужності трубопроводів і зниження температури перекачування газу викликали необхідність розроблення нових конструкцій труб і нової технології їхнього виробництва, з'явилися багат шарові труби з витих оболонки, двошарові спіралешовні, безшовні труби з пустотілих заготовок, отриманих методом безперервного розливання розплавленої сталі, та ін.

У теоретичних положеннях, покладених в основу розроблення нових марок сталі для газопроводів, виходять із можливостей керувати властивостями сталі шляхом максимального роздрібнення її структури та субструктури у процесі контрольованої прокатки з наступним використанням методу прискореного регульованого охолодження.

Водночас основним напрямом буде удосконалення та розвиток виробництва термічно зміцнених труб. Швидкий прогрес, досягнутий у галузі виробництва прогресивних трубних сталей за останні 15–20 років, добре ілюструють такі цифри. Тимчасовий супротив металу труб зріс із 500–540 до 600–650 МПа, ще більше підвищилася межа текучості. Холодостійкість сталі, тобто температура переходу металу в крихкий стан, знизилася з +5...0 до -15...-25 °С і навіть до -40 °С під час оцінювання її стосовно магістральних газопроводів, що важливо для північних територій, наприклад Канади, Аляски та ін. [11].

В'язкість сталі, що оцінюють за Шарпі (KCV), підвищилася з 0,1–0,2 МДж/м² за температури -15 °С до 0,8–1,2 МДж/м² за такої ж температури. Зараз розроблені трубні сталі із в'язкістю 1,5–2 МДж/м² і більше [14].

Подальше покращення властивостей труб і підвищення їхніх економічних показників буде досягатися шляхом комплексних заходів. Можна чекати, що основна увага буде приділена зменшенню витрат легуючих домішок і повному виключенню таких дефіцитних елементів, як молібден, за деякого підвищення механічних характеристик сталі труб, а також в'язкості та холодостійкості.

Досягнуті великі успіхи у підвищенні властивостей трубних сталей за невеликих витрат легуючих елементів. З організацією масового випуску сучасних малоперлітних сталей, контрольованої прокатки для виготовлення труб різко знизився інтерес споживачів до труб нових конструкцій. Незважаючи на велику кількість запропонованих конструкцій, технічна розробка до рівня промислового апробування виконана лише для двошарових спіралешовних труб і багатшарових труб з оболонки. Мабуть, у перспективі не слід чекати розроблення нових конструкцій труб, бо фактично робочі параметри газонафтопроводів уже близькі до оптимальних. До того ж розвиток виробництва труб буде визначатися техніко-економічними показниками транспортування продуктів трубопроводами, запасами нафти та газу, які далеко не безмежні [13].

У найближчій перспективі (2020–2030 рр.) виникне необхідність у спорудженні потужних газонафтопроводів, а також розвинутій мережі некрупних продуктопроводів,

системи промислових, збірних мереж різних діаметрів і тисків аж до високих (порядку 12–35 МПа). Отже, залежно від робочих параметрів газонафтопроводів і промислових мереж доцільно випускати типи труб, які відрізняються як діаметром і конструкцією, так і (це головне) типом сталі. Сучасна класифікація труб значною мірою вже визначилася. Ось приблизно схематична специфікація типів труб і сталей для газонафтопроводів, які будуть розглянуті нижче:

– для трубопроводів діаметром 325–530 мм відповідального призначення на тиск 10 МПа і вище за низької температури перекачування, а також для трубопроводів, які транспортують деякі види нафтопродуктів, слід використовувати тільки безшовні труби з катаної заготовки, наприклад, які поставляють за ЧМТУ24-3-1128-82 для будівництва газліфтів, тобто трубопроводів, призначених для закачування попутного газу в пласт під тиском 12 МПа і вище. Аналогічної якості безшовні труби використовувалися для будівництва аміакопроводів. Як правило, за діаметра менше 530 мм (залежно від тиску в трубопроводі) економічні й надійні труби із простих вуглецевих сталей марок 10 і 20 (ГОСТ 1050-74), а також сталі марки ВСт3 (ГОСТ 380-71) у гарячекатаному чи термозміцненому стані. Слід звернути увагу, що термозміцнені сталі найбільш конкурентні з низьколегованою сталлю марки 09Г2С;

– для трубопроводів діаметром менше 500 мм використовують безшовні та зварні труби з простих вуглецевих гарячекатаних і термозміцнених сталей; окремо стоїть питання стосовно труб вказаного діаметру, які розраховані на роботу під тиском 10–35 МПа;

– для трубопроводів 500–1020 мм використовують зварні труби з простих низьколегованих сталей типу 17Г1С у гарячекатаному нормалізованому чи термозміцненому стані;

– для трубопроводів діаметром 1020–1420 мм, призначених для роботи під високим тиском, використовують зварні труби зі сталей контрольованої прокатки та низьколеговані термопокращені сталі, а також труби спеціальних конструкцій.

Труби – головний конструктивний елемент будь-яких трубопроводів. Їхня якість, властивості металу та зварювальних з'єд-

нань значною мірою визначають можливі відмови, зупинки й аварії на газонафтопроводах, а також розміри та наслідки відмов і аварій. Тому необхідно знати вимоги до сталі та зварювальних з'єднань труб залежно від робочих параметрів трубопроводів із метою попередження їх руйнування. Специфіка роботи газонафтопроводів зумовлена принципово відмінними вимогами до сталі труб великого діаметру на високий робочий тиск порівняно з будь-якими іншими сталевими конструкціями [7, 11].

Особливу складність і найбільшу практичну цінність становлять дані про природу та механізм гальмування протяжних в'язких розривів. Фізична суть таких руйнувань полягає в такому. Під час розриву трубопроводу стиснутий газ спрямовується в утворену несучільність (тріщину), при цьому прагне розгорнути трубу в лист, а її крайки при цьому сприяють руйнуванню з високими швидкостями. Одночасно внаслідок декомпресії газу з трубопроводу по мірі розвитку руйнування відбувається зниження тиску, що діє на борти труб у вершині виниклої тріщини. Дія цих двох факторів і властивості металу труб визначають характер і масштаби руйнування.

Особливістю в'язкого руйнування газопроводів є утворення широкої зони пластично деформованого матеріалу уздовж крайки розриву. Отже, розповсюдженню швидкісного протяжного в'язкого руйнування в трубі чинить опір великий об'єм металу, що працює в пружнопластичній області. Відомо, що фізична суть спротиву сталі труб в'язкому руйнуванню визначається міцністю її на розрив під час швидкісного навантаження й об'ємом металу, що деформується, в зоні розриву. Однак відсутність швидкісних випробувальних машин із швидкостями навантаження 100–300 м/с досі перешкоджає фізично правильному визначенню спротиву сталі труб газопроводу руйнуванню, внаслідок чого доводиться користуватися наближеним методом оцінювання властивості сталі на зразках, які випробують на ударний згин, або проводити контрольні дорогі випробування повнорозмірних труб до руйнування, включаючи випробування секцій труб повітрям чи газом. У процесі проектування та спорудження трубопроводів слід детально розглядати питання опору металу труб і

зварювальних з'єднань руйнуванню за умов експлуатації нафтогазопроводів.

Складність урахування роботи нафтопроводів під час циклічного навантаження полягає в тому, що спротив металу труб і зварювальних з'єднань оцінюють за результатами випробувань зразків на осьове розтягування, тоді як метал у трубопроводах працює за умов двовісного напруженого стану за наявності конструктивних і технологічних концентраторів, що може істотно знизити циклічну міцність трубопроводу. Тому важливо, поряд із правильним вибором труб, вжити під час проектування заходів зі зменшення амплітуди коливань і крутизни хвиль тиску, які виникають за повної зупинки насосних станцій [12]. Практика експлуатації нафтопроводів свідчить, що циклічні навантаження, спричинені динамічним (турбулентним) процесом перекачування, інколи призводять до утворення втомних тріщин у концентраторах, які викликають руйнування трубопроводів.

Відомо [13, 14], що наявні гідравлічні методи випробування під високим тиском, які викликають у нижніх точках трубопроводів кільцеві напруження, що дорівнюють номінальній межі текучості металу труб чи дещо вищі від неї, дають змогу досить повно виявити дефектні ділянки трубопроводів і тим самим забезпечити надійну та практично безвідмовну експлуатацію споруди.

Вважається, що трубопровідний транспорт є одним із найбільш економічних способів передачі рідких і газоподібних продуктів на далекі відстані з мінімальними втратами продукту в процесі доставки його споживачу. Сучасні магістральні трубопроводи – це виключно протяжні металеві спорудження, довжина яких перевищує тисячі кілометрів.

Відомо [10], що руйнування магістральних газонафтопроводів занадто небезпечні. Зона враження навколишнього середовища від осередку руйнування становить від декількох сотень метрів до декількох кілометрів. Особлива небезпека під час руйнувань пов'язана з можливістю загазованості територій і населених пунктів, утворення небезпечної суміші газу та повітря, загоряння продуктів транспортування, їх можливим попаданням у крупні водойми. Відомо [6], зокрема, що лише 1 т розлитої нафти створює на поверхні водойм масляну плівку площею

18 км². У таких випадках відновлення екологічної рівноваги вимагає проведення цілого комплексу рекультиваційних робіт, що, звичайно, пов'язано зі значними матеріальними витратами.

Умови роботи металу труб у газонафтопроводах високого тиску суто специфічні, різко відрізняються від умов роботи металу в інших металевих конструкціях, що зумовлено такими чинниками [4, 10, 12].

1. Експлуатація металу труб одного і того ж трубопроводу внаслідок його великої протяжності здійснюється в різко відмінних природно-кліматичних умовах – від мінусових температур у північних регіонах країни до плюсових у південних. Цими ж умовами визначається широкий діапазон типів і механічних характеристик ґрунтів, у яких прокладено трубопровід; можливість виникнення в металі труб пластичних деформацій під час перетину різноманітних природних перешкод – річок, боліт, гір, озер тощо.

У підземних газопроводах метал працює за температури ґрунту. Затиснення труб діаметром до 1020 мм ґрунтом здійснюється на ділянці довжиною декілька десятків метрів. Як показали результати експериментальних вимірювань пружних осьових переміщень і напружень, знятих під час розрізки аварійного підземного газопроводу діаметром 425 мм, затиснення труб ґрунтом здійснюється на довжині 25–50 м. Переміщення кінців труб у місці розрізу досягали ≈ 29 мм, а поздовжні напруження ≈ 200 МПа. У газопроводах діаметром 1020 мм і більше затиснення трубопроводу ґрунтом не завжди буває достатнім; температурний режим і величина поздовжніх деформацій значною мірою визначаються умовами роботи апаратів повітряного охолодження (АПО) та їхньою кількістю. За відсутності АПО температура трубопроводу може зростати за його довжиною, бо ґрунт уже не здатний відбирати тепло, отримане газом під час компримування. Тому забезпечення затиску потужних газопроводів у ґрунтах, попередження їх підйому чи вигинання в болотистих і обводнених місцях є складною технічною задачею, яку не завжди можна надійно вирішити, внаслідок чого стійкість трубопроводу не завжди буває надійно забезпечена.

2. Залежно від природно-кліматичних умов метал труб працює в широкому діапазо-

ні температур – від 30...40 °С у літній період до -15...-20 °С в зимовий. Будівельно-монтажні роботи на трубопроводах виконують у деяких випадках лише зимою за температури до -40 °С (наприклад, на нафтогазових родовищах Канади, Аляски та ін.).

3. Метал труб протягом амортизаційного циклу (більше 30 років) практично постійно працює за умов двовісного напруженого стану з різним, залежним від багатьох факторів, відношенням напружень в кільцевому й поздовжньому напрямках. Крім того, метал нафтопроводів піддається малоцикловим навантаженням, які в окремих випадках можуть спричинити напруження, що досягають межі текучості.

Вплив схеми напруженого стану трубопроводів на пластичні властивості металу труб наочно простежується по зміні відносного подовження. Так, коли на плоских п'ятикратних зразках під час одновісного розтягування подовження становить 20–30%, то за умов плоского напруженого стану під час гідравлічних випробувань до руйнування повнорозмірних труб пластичне подовження периметра досягає тільки 3–7%, а в трубах із високов'язких пластичних сталей контрольованої прокатки – 8–12%.

4. У металі трубопроводів, як правило, неминуча наявність концентраторів – задир, подряпин, орієнтованих уздовж утворюючої труби. Вони можуть бути заводського, транспортного та будівельного походження. Дія концентраторів напружень посилюється в місцях відхилення труби циліндричної форми через овальності перерізів і наявність вм'ятин.

Експериментальні дослідження дали змогу встановити зміну кільцевих деформацій зовнішньої поверхні від внутрішнього тиску в трубах із різною овальністю (в перерізі за малою віссю овалу). Зокрема, по мірі зменшення овальності за рахунок збільшення внутрішнього тиску значення деформацій у вказаному перерізі росте тим швидше, чим більша овальність у вихідному стані. За тиску 1 МПа локальні деформації можуть досягати значень, відповідних межі текучості, за більш-менш низького значення середніх напружень у металі труби. Максимальне значення локальної деформації становить близько 0,6% за тиску 5,5 МПа, потім приріст деформацій закінчується, що відповідає

моменту прийняття трубою циліндричної форми.

Найбільш небезпечним для роботи труб є сполучення в одному перерізі вм'ятини та задиру чи наявність задиру на малій осі овального перерізу труб. Аналіз обставин багатьох руйнувань труб на трасі показує, що переважне число руйнувань відбувалося по верхній чи нижній утворюючій, тобто за малим діаметром овального перерізу труб, укладених у ґрунті, оскільки лише так орієнтовано переріз труб газопроводу, укладеного в траншею та засипаного ґрунтом.

5. Газопроводи акумулюють велику кількість пружної енергії стиснутого газу, внаслідок чого в них можуть виникати протяжні в'язкі та крихкі руйнування, які відбуваються за умов високих динамічних навантажень. За високої енергоємності процесу руйнування і швидкості навантаження можлива зміна характеристик металу труб.

6. Велика енергетична потужність магістральних трубопроводів, які забезпечують сировиною чи енергією крупні підприємства й цілі промислові райони, вимагає стабільної поставки продуктів споживачу. Метал газонафтопроводів практично неможливо піддати профілактичному огляду та провести попереджувальний ремонт. Можливий тільки капітальний ремонт трубопроводів із зупинкою їх на довготривалій термін в обставинах, які виправдовують таку зупинку. Все це зумовлює необхідність прийняття широкого комплексу заходів із метою попередження руйнувань трубопроводів, а у разі виникнення – їх максимальної локалізації, забезпечення безпеки близько розташованих об'єктів і обслуговуючого персоналу, створення умов для швидкого виконання ремонтно-відновлювальних робіт. Тому, незважаючи на уявну простоту конструкції і розрахункової схеми, трубопровід є складним, дороговартісним, виключно металоємним і відповідальним спорудженням. Цим пояснюється велика увага, яка приділяється розробленню питань експлуатаційної надійності магістральних трубопроводів як у нашій країні, так і в інших країнах світу.

Міцність магістрального трубопроводу, його експлуатаційна надійність визначається насамперед силовими факторами, властивостями та якістю труб. Для магістральних трубопроводів основними навантаженнями

є внутрішній тиск і поздовжні зусилля, спричинені температурним перепадом у лінійній частині трубопроводу унаслідок різниці температурних умов будівництва й експлуатації. Норми та правила розрахунку, необхідні формули і значення коефіцієнтів приймають відповідно до БНіП 2.05.06-85*.

Досить точному розрахунку піддаються тільки кільцеві напруження, а поздовжні напруження і стійкість трубопроводу визначаються не лише впливом температури, але й умовами взаємодії трубопроводу з ґрунтом, наявністю обважнювачів, опор, компенсаторів та ін. Фактичні руйнування трубопроводів не були пов'язані з недостатнім запасом міцності, тобто не були викликані перевищенням діючих кільцевих напружень над розрахунковими [11]. Більшість руйнувань була зумовлена недостатнім спротивом сталі труб зародженню тріщин, втратою поздовжньої стійкості під час температурних дій, поперечним зломом труб під час просідання ґрунту, корозійними пошкодженнями, відхиленням дійсних умов навантаження від розрахункових у конструкціях підводних переходів за умов весняних паводків.

Тому експлуатаційну надійність трубопроводів забезпечують шляхом попередження руйнувань. Так, руйнування, що пов'язані з недостатнім спротивом зародженню і розвиненню тріщин, попереджають металургійними методами – підвищенням механічних властивостей, якості сталі та зварювальних з'єднань труб, а руйнування, пов'язані зі втратою місцевої чи загальної стійкості трубопроводів, – удосконаленням методів розрахунку і проектування, а також підвищенням якості виконання будівельно-монтажних робіт; крім того, розробляють і вдосконалюють заходи протикорозійного захисту.

Починаючи з 1990 р. через використання холодостійких труб стало можливим підвищувати робочий тиск у газопроводах до 7,5–8,8 МПа, а також знижувати температуру прокачування газу до -25°C без збільшення максимального діаметра використаних труб. У колишньому СРСР, а також у таких країнах, як Канада, США, Норвегія, з технологічних міркувань і для підвищення пропускної здатності газопроводів стали використовувати апарати повітряного охолодження (АПО). При цьому розпочато виробництво унікаль-

них холодильних установок для газових промислів. Переміщення місць добування газу у віддалені північні райони, наявність холодильних установок для газопроводів зумовило щорічне зростання потреби у сталях, труби з яких здатні працювати за температур $-5...-15^{\circ}\text{C}$, з можливим зниженням температури експлуатації до -25°C [11, 13].

Коли властивості труб не дають змоги знижувати температуру газу до -5°C в середньому кліматичному поясі та до -15°C в північному, то це потребує відключення АПО за температури повітря зимою нижче відповідно -15 і -25°C , які у вказаних кліматичних зонах північних країн – Канади, Норвегії, США (Аляска) – спостерігаються протягом 2–4 місяців на рік. Наявність труб із холодостійких сталей дає змогу за рахунок більш повного використання природного холоду додатково, без капітальних вкладень у будівництво, перекачувати до 1 млрд m^3 газу на рік кожним газопроводом діаметром 1020 мм.

Слід також відзначити, що в цій роботі автори не розглядали вибір сталі та труб

для мереж, якими транспортують кислі гази (тобто гази, які утримують у своєму складі сірководень і вуглекислоту, а також корозійно-активні сірчисті нафти). Це спеціальне питання, і вирішується воно комплексно як шляхом зниження корозійної активності технологічного продукту (наприклад, нагнітання у свердловини чи трубопроводи інгібіторів корозії), вибору в'язких і чистих за складом сталей, так і шляхом зниження робочих напружень у металі труб із метою попередження чи зниження швидкості розвитку корозії під напруженнями.

Виходячи з вищевикладеного, слід зауважити, що у всіх розглянутих випадках застосування труб для різних трубопроводів автори вважають недоцільним вказувати конкретні марки сталей, бо вони занадто швидко змінюються чи модифікуються, а ось тип сталі – вуглецева, низьколегована, сталь контрольованої прокатки – поняття більш стабільне і надає достатню базу для вибору конкретної марки сталі під час проектування та будівництва трубопроводів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Похмурский В.И., Мелехов Р.К., Круцан Г.М. и др. Коррозионно-механическое разрушение сварных конструкций. – К.: 1985. – Наукова думка.
2. Радкевич О.И., Пясецкий О.С., Василенко И.И. Коррозионно-механическая долговечность трубной стали в сероводородной среде. Физ.-хим. механика материалов. 5: – 2000. – С. 93-97.
3. Саакиян Л.С., Ефремов А.П. (1982). Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии. – Москва. – Недра.
4. Макаренко В.Д., Грачев С.И., Прохоров Н.Н. и др. Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири. К.: – 1996. – Наукова думка.
5. Моношков А.Н., Пыхов С.И., Пустин И.А. (1992). Пластическая устойчивость и ее роль в оценке прочности труб. – Москва. – Металлургия.
6. Щеглов Б.А. (1995). Оценка механических свойств листовых металлов при гидравлических испытаниях. – Москва. – Металлургия.
7. ГОСТ (1989). Трубы: Методы испытания гидравлическим давлением. – Москва. – Изд-во Стандартов.
8. Бородавкин П.П. (1992). Подземные трубопроводы: Проектирование и строительство. – Москва. – Недра.
9. Лютак В.П., Бойчук І.Я. (2002). Експлуатаційна надійність нафтопроводів у умовах НГДУ «Надвірнанафтогаз». – Нафтова і газова промисловість. 2. 38 – 40.
10. Гумеров А.Г., Ямалеев К.М., Журавлев Г.В. и др. (2001). Трещиностойкость металла труб нефтепроводов. – Москва. – Недра-Бизнесцентр.
11. Бриду Н., Лафранс М., Прову А. (1986). Разработка новых сортов стали с повышенными характеристиками для транспорта кислого газа и нефти. – Москва. – Юзичор Асье.
12. Канеко Т., Окада У., Икеда А. (1989). Влияние микроструктуры на чувствительность к SSC низколегированных высокопрочных трубных изделий для нефтедобывающих стран. – Япония. – Сумитомо Ltd.
13. Анучкин М.П., Горицкий В.Н. (1986). Трубы для магистральных трубопроводов. – Москва. – Наука.
14. Yu G.-H., Cheng Y.-H., Chen L. et al. (1997). Hydrogen Accumulation and Hydrogen-Induced Cracking of API C90 Tubular Steel. Corrosion. Vol. 53. 10. 762-769.
15. Chu W.-Y., Li S.-Q., Hsiao C.-M. et al. (1981). Effect of Hydrogen on the Apparent Yield Stress – Research on the Cause of Hydrogen-Induced Delayed Plasticity. Corrosion. Vol. 37. 9. 514-521.
16. Lunarska E., Nikiforow K., Pyrza J. (2005). Monitoring of the hydrogen charging of the industrial installations. – Corrosion-2005. 1. 53-58.
17. Makarenko V.D., Beljaev V.A., Galichenko E.N., Prohorov N.N. (2001). Effect of modifying additions on the ductility and plastic properties and the brittle strength of coldresistant, low-alloy steel. Welding International. 15 (1). 62-70.