

УДК 624.017

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ГІДРОПНЕВМАТИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ ТРУБОПРОВОДІВ З МОНОЛІТНИХ І КОМПОЗИТНИХ ТРУБ В ПОЛІГОННИХ (НАТУРНИХ) УМОВАХ

В.Д. Макаренко¹,

д-р техн. наук, професор

В.І. Гоц¹,

д-р техн. наук, професор

С.Ю. Максимов²,

д-р техн. наук, ст. наук. співробітник

Ю.В. Макаренко³,

магістерка

Д.Я. Кислюк⁴,

канд. техн. наук, доцент

¹Київський національний університет будівництва і архітектури²Інститут електрозварювання імені Євгена Патона НАН України³Університет "Манітоба", м. Вінніпег, Канада⁴Луцький національний технічний університет

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.44-53

Приведений огляд методів і критеріїв експериментальних досліджень трубних сталей, які експлуатують під динамічним навантаженням. Обґрунтовано, що найбільш вірогідний матеріал досліджень відповідає експлуатаційним умовам, коли випробування крупно розмірних труб проводяться в натурних (спеціалізованих) умовах.

Ключові слова: багатошарові труби, руйнування, надійність, технологія, зварюваність, полігонні випробування.

Вступ. Щорічна потреба сталі тільки для виробництва труб великого діаметра (800-1400 мм) в країнах бувшого СРСР складає приблизно 300 тис. т. У зв'язку з цим при розробці сталі для труб, наряду з вимогами високої надійності в експлуатації, стоїть питання забезпечення мінімальної їх вартості при високій міцності, в'язкості і холодостійкості.

Відомо, що за короткий термін діаметр використовуваних труб підвищився з 325-520 мм (наприклад, перші газопроводи «Саратов», «Дашава-Київ-Брянськ») до 1220-1420 мм на сучасних газонафтопроводах (наприклад, газопровід «Дружба», Новий Уренгой–Помари-Ужгород). Різко виросли вимоги до міцності трубної сталі (з 480-500 до 600-700 МПа) при одночасному підвищенні її в'язкості і зварюваності в польових умовах. Вимоги до ударної в'язкості метала труб з факультативних значень 0.3 МДж/м² на стандартних зразках з круглим надрізом (Менаже) підвищився до 0.8-1.2 МДж/м² на зразках з гострим надрізом (Шарпі). Все це викликало інтенсивний розвиток наукових досліджень в металургійній і трубній промисловості.

Розв'язати поставлені задачі на базі звичайних низьколегованих нормалізованих сталей вже не представляється можливим, так як при такому виробництві підвищення міцності сталі неминуче призводить до зниження її в'язкості і погіршенню зварюваності.

За останні 20-25 років організовано виробництво нового типу малоперлітних чи безперлітних сталей, отриманих методом контрольованої прокатки. Високі властивості цього типу сталей досягаються при мінімальному легуванні (мікролегуванні карбонітрідними елементами) за рахунок максимального роздроблення її структури при прокатці і контрольованому швидкісному охолодженні. Підвищення пластичності і в'язкості сталі забезпечується завдяки формуванню однорідної структури і субструктури, зниженому вмісту шкідливих домішок і неметалевих включень, зниженню рівня локальних внутрішніх напружень.

Металурги добились зниження вмісту сірки в металі – з 0.04 до 0.002-0.006 %, балу зерна – з 7-8 номера до 12-14. Фізична суть нового типу сталі для труб полягає в формуванні можливо більш однорідної і дисперсної структури. Такий тип сталі може бути отриманий шляхом використання різних режимів контрольованої прокатки чи термічного покращення.

Зростання потужності трубопроводів і зниження температури перекачки газу спричинили необхідність розробки нових конструкцій труб і нової технології їх виробництва.

Принципова особливість цієї статті полягає в детальному розгляді питань спротиву метала труб і їх зварних з'єднань руйнуванню в умовах експлуатації трубопроводів.

Розглянуті методи випробувань готових трубопроводів і їх вплив на надійність експлуатації. Показано, що гідравлічні і пневматичні випробування під високим тиском, що спричиняють в нижніх точках трубопроводів кільцеві напруження, що дорівнюють номінальній межі текучості металу труб чи декілька вище за неї, дозволяють достатньо точно виявити дефектні ділянки трубопроводів і тим самим забезпечити надійну, практично безвідмовну, експлуатацію трубопровідної конструкції.

Таким чином, в роботі розглянуто широкий круг питань, зв'язаних з виробництвом і використанням труб з багат шаровою стінкою, застосуванням високоміцних сталей, спротивом сталі труб зародженню і розповсюдженню в'язких і крихких руйнувань.

Відповідальні металокопункції нафтогазових об'єктів, зокрема, магістральні і промислові нафто- і газопроводи, які використовуються для транспортування нафти і газу, часто працюють в екстремальних кліматичних (температура коливається від +40 до -30°C) і інженерно-геологічних умовах, контактуючи з корозійно-агресивними продуктами. Їх руйнування супроводжується великими матеріальними і екологічними втратами.

Ціль роботи – експериментальні гідропневматичні випробування трубопроводів, які складені з монолітних і композитних (багат шарових) труб при полігонних (натурних) умовах та розробка перспективних шляхів подовження безаварійного робочого ресурсу нафтогазопроводів.

Так, як одним з варіантів подовження робочого ресурсу трубопроводів є використання багат шарових труб [18], то більш детально розглянемо їх копункцію.

Конструкція багат шарових труб

Багат шарові труби збирають з оболонок, виготовлених по принципу плоскої спіралі Архімеда, і з'єднують між собою двосторонніми багат шаровими швами. Товарна труба довжиною 11-11.6 м складається з п'яти багат шарових оболонок і двох оболонок з монолітною стінкою. Конструкція труби показана на рис. 1.

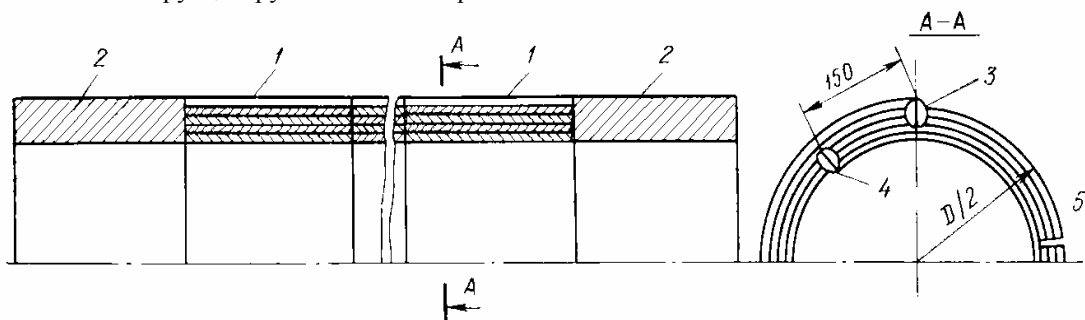


Рис. 1. Схема багат шарової труби. Позначення: 1 – оболонки (4-х шарів);

2 – кінцеві оболонки з монолітною стінкою; 3, 4 – зовнішній і внутрішній поздовжні нахлостові зварні шви з проваром на два шари; 5 – дренажні отвори діаметром 10-14 мм (по дві на кожній оболонці)

Установка по кінцях труб монолітних патрубків має цілком забезпечити герметичність торців труб, підвищити їх поперечну жорсткість з ціллю покращення процесу будівництва трубопроводів, а також підвищити ремонтоздатність труб при експлуатації газопроводів. Складання труб з двох видів оболонок помітно ускладнює технологію їх виготовлення і підвищує їх вартість. Рівна міцність поздовжніх швів оболонок забезпечується проваром двох шарів, не враховуючи захлюстування. В багат шарових конструкціях труб пред'являються

особливо жорсткі вимоги до герметичності внутрішнього шару, тому що навіть незначна негерметичність, наприклад, через наявність пір, призводить до накопичення стиснутого газу в міжшаровому зазорі.

При зупинці газопроводу (скид тиску) відбувається витріщення внутрішнього шару, що перешкоджає пропуску очисних поршнів по газопроводу.

Багатошарові конструкції повинні мати дренажні отвори, які проходять від зовнішнього до внутрішнього шару. Дренажні отвори діаметром 10-14 мм призначаються для скидання тиску з міжшарового зазору у випадку розгерметизації внутрішнього шару. Для того, щоб через дренажні отвори в міжшарові зазори не потрапляла волога, яка сприяє корозії, вони повинні бути законсервовані. В багатошарових трубах закриття дренажних отворів здійснюється за допомогою клапанів, конструкція яких забезпечує вихід газу з міжшарового зазору, але перешкоджає проникненню туди вологи (рис. 2).

Технологія виготовлення багатошарових оболонок повинна забезпечувати щільну намотку з міжшаровим зазором не вище 0.1 мм. Вимоги до механічних властивостей основного металу

труб і зварних з'єднань оговорюються технічними умовами [18].

Всі зварні з'єднання і суцільність внутрішнього шару труб повинні бути проконтрольовані фізичними неруйнівними методами.

Приклад дослідно-експериментального зразка багатошарової труби, виготовленого в ІЕС ім. Є.О. Патона НАНУ, показано на рис. 3.

Результати широкого промислового виробництва сталі 17Г1С показали, що виготовлення її не викликає великих труднощів, а властивості готових труб із цієї сталі отримуються достатньо стабільними. У зв'язку з цим сталь 17Г1С є основною для виготовлення труб діаметром 1020 і 1220 мм.

З урахуванням необхідності подальшого підвищення в'язких властивостей сталі 17Г1С було введено обмеження вмісту в ній сірки і фосфору: не більше 0,020% і 0,025% відповідно. Це дозволило значно підняти ударну в'язкість. Сталь 17Г1С-У почали використовувати для труб діаметром 1020 і 1220 мм, а сталь 17Г1С пішла на виробництво труб діаметром 530-820 мм.

Різновидністю сталі 17ГС є сталь 12Г2С, розроблена для виготовлення гаряче направлених

газопровідних труб діаметром 530, 720 і 1020 мм (в заміні сталі 14ХГС). Вуглецевий коефіцієнт цієї сталі складає 0,35-0,43 при максимально допустимому 0,46.

Нормалізована сталь 12Г2С характеризується підвищеним спротивом руйнуванню при оцінці ударної в'язкості і волокнистості в зломі. Комплекс в'язких властивостей при мінусових температурах вказує на принципову можливість використання сталі 12Г2С для труб в "північному" виконанні. Перехідна температура напів крихкого руйнування лежить в інтервалі 30 - -40 °С, в той же час як у сталі 14ХГС при -10 - +10 °С.

Для спіральшовних труб звичайного призначення використовують сталі 17Г1С, 17Г1С-У, 17Г2СФ, які характеризуються рівнем міцності від 510 до 540 Н/мм². На базі сталі 17Г1С розроблена сталь 17Г2СФ, яка містить 0,05-0,1% V і 0,01-0,03%, ті, що надають можливість отримати в листах після нормалізації властивості, що відповідають вимогам трубних сталей для будівництва нафтогазопроводів. Сталь 17Г2СФ має гарну технологічність в трубній переробці (формовка, зварка по звичайній технології). Міцність зварюваного з'єднання була вище міцності основного металу.



Рис. 2. Дренажний отвір багатошарової труби газопроводу діаметром 1420 мм

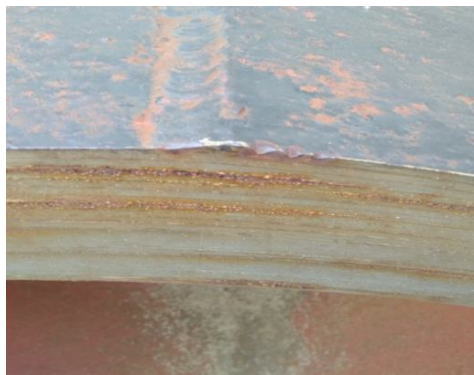


Рис. 3. Дослідно-експериментальний зразок багатошарової труби (5-ть шарів)

Для більш відповідального призначення розроблена рулонна сталь 08Г2СФБ з тимчасовим спротивом 540 Н/мм².

Трубні сталі з карбонітридами ванадію (типу 17Г2АФ, 17Г2САФ, 15Г2АФЮ і ін.) мають різний вміст вуглецю, кремнію, алюмінію. В якості обов'язкових мікролегуючих елементів вони містять ванадій (0,05-0,12%) і азот (0,015-0,025%). В гарячекатаному стані ці сталі мають високу міцність (650-700 Н/мм²) і не достатньо високу ударну в'язкість. Після нагріву вище температури A_{c3} з охолодженням на повітрі (нормалізація) міцність дещо знижується, але пластичність і ударна в'язкість зростають (на 5-10% і при -40°C на 30 - 40 Дж/см² відповідно).

Із листових вказаних сталей (15Г2АФ, 17Г2САФ, 14Г2АФ-У, 15Г2АФЮ і ін.) виготовляли труби діаметром 1020-1220 мм із застосуванням метода гарячої правки (сталь 15Г2АФ) чи холодного експандирування.

Для підвищення в'язких властивостей була апробована сталь з карбонітридним зміцненням, яка містила близько 1% Ni, 0,03% Nb (14НБАФ) і незначну кількість сірки. Легування сталі нікелем і ніобієм підвищило холодостійкість до рівня -60 °C.

При порівнянні низьколегованих сталей для труб великого діаметра з однаковою міцністю - з наявністю мікролегуючих елементів і без них, можна відмітити, що перші характеризуються значно кращими показниками ударної в'язкості при низьких температурах, пластичністю і більш низькою перехідною температурою крихкого руйнування.

Як видно з аналізу розглянутих марок сталей, для забезпечення вимог стосовно властивостей труб необхідно використовувати сталі з малим вмістом вуглецю, при наявності марганцю і кремнію. Розробка нових марок сталей йде, в основному, шляхом мікролегування ванадієм, титаном, нікелем і деякими іншими елементами, які дозволяють отримувати дрібнозернисту структуру з високою ударною в'язкістю і холодоломкістю. Велике значення надається чистоті металу при мінімальному вмісті шкідливих домішок (сірки, фосфору).

Використання контрольованої прокатки дозволяє отримувати високі механічні властивості за рахунок застосування максимальних обтисків при температурах, близьких до температури рекристалізації, що відповідає режиму нормалізації. В карбонітридних і деяких мікролегованих сталях для отримання потрібних механічних властивостей використовуються різні методи термообробки.

За останні 5-10 років металургійна промисловість освоїла серійне і масове виробництво низки низьколегованих малоперлитних сталей для газопровідних труб діаметром 1020-1420 мм на тиск 5,4-7,4 МПа в "північному" виконанні, які піддавалися контрольованій прокатці на товстолистових реверсних станках. При розробці складу вказаних сталей на різних етапах їх освоєння і використання були застосовані різні системи зміцнюючого мікролегування: спільними домішками ніобію і ванадію (сталь 07Г2ФБ); комплексне мікролегування ніобієм, ванадієм і невеликою кількістю титану, призначеного для зв'язування азоту і роздроблення зерна (09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБ-У); карбонітридним зміцненням ванадієм і азотом (08Г2ФЮ); ванадієм без спеціального долегування азотом (10Г2Ф), титаном в кількості до 0,035% (13ГС, 13ГС-У, 13Г1С-У).

За час від промислового випробування першої вітчизняної малоперлитної сталі 07Г2ФБ досягнутий значний прогрес в технології виробництва сталей для газопровідних труб великого діаметра в "північному" виконанні.

Завдяки удосконаленню методів



Рис. 4. Фрагменти розірваних краєв багатопрофільної труби, яка служила в якості пастки для зупинки тріщин

позапічної обробки значно знизився вміст сірки. Освоєння режимів контрольованої прокатки з кінцевою деформацією в середній і нижній частинах областей дозволило суттєво підвищити міцнісні характеристики і спротив крихкому руйнуванню.

Методика гідропневматичних випробувань складних трубопроводів в полігонних умовах.

Детально методика натурних випробувань трубопроводів, виконаних в полігонних умовах, наведена в роботах [16, 17, 18].

Результати експериментальних випробувань і їх обговорення.

Гідравлічні випробування багатошарових труб до руйнування в цілях оцінки їх конструктивної міцності показали, що вони руйнуються в зонах поздовжніх захлюстових швів, при цьому коефіцієнт використання міцності металу складає менше 1 (близько 0.95-0.98 від розрахункової міцності). Для підвищення коефіцієнта міцності необхідно, щоб в трубах стабільно забезпечувався провар поздовжніх нахлюстових швів на два шара, не враховуючи захлюстових. В іншому випадку руйнуванню чинять опір тільки три шара в чотирьохшаровій трубі. При цьому коефіцієнт використання міцності сталі може знизитися до 80%. Отже, якості виконання і контролю поздовжніх захлюстових швів повинна буди приділена особлива увага [18].

Для дослідження чутливості багатошарових труб із сталі 09Г2СФ до локальної пластичної деформації, у зв'язку з можливістю утворення у них вм'ятин, були проведені спеціальні гідравлічні випробування повнорозмірних труб, які склалися з п'яти багатошарових оболонок і двох монолітних. У випробуваних трубах були зроблені вм'ятини з стрілкою зворотнього прогину 4-6 мм в основному металі і 2-4 мм в зоні кільцевого стику багатошарових оболонок. Встановлено, що при тиску 8 МПа всі вм'ятини повністю випрямились, при цьому порушень герметичності труб не було зафіксовано. При підвищенні тиску до 12 МПа, що відповідало кільцевим напруженням в стінці труб 514 МПа (при нормативному тимчасовому спротиву металу труб 600 МПа), в одному із зварних кільцевих стиків утворилася наскрізна поздовжня, по відношенню до осі труби, тріщина довжиною 25 мм. Дослідженнями була встановлена підвищена деформативність багатошарових оболонок. Поздовження параметрів складало 28-37% в порівнянні з 0.07-0.03% в монолітних кінцевих оболонках. Оскільки поперечна жорсткість багатошарових оболонок суттєво нижче монолітних, можливість утворення вм'ятин у них завжди буде значно вище, тому забезпеченню необхідної пластичності кільцевих швів багатошарових труб, виключенню можливості зародження у них тріщини повинно бути приділено особливу увагу.

Пневматичні випробування окремих труб діаметром 820 мм і довжиною до 10 м із запасом повітря до 25-75% об'єму труби (решта обсягу труб заповнювався водою) були проведені на полігоні ВНДІБТа із запуском крихкої і в'язкої тріщин при напруженнях в металі труб, рівних 0.5-0.95 від межі текучості. Досліджувалися труби, виготовлені з різних марок низьколегованої сталі, повністю розкисненої (спокійної) і напівспокійної сталі. Встановлено, що спротив багатошарових труб розповсюдженню руйнування при пневматичних випробуваннях у всіх дослідженнях був задовільним. Руйнування локалізувалися на довжині одної оболонки, рівної 1.5 м. При ініціюванні крихкого руйнування спостерігалось пошарове розгалуження тріщин, що розповсюджуються по різним траєкторіям. При запуску в'язкого руйнування з центральної багатошарової оболонки тріщини також розгалужувалися, розповсюджуючись по різним траєкторіям в зовнішніх і внутрішніх шарах і досягаючи стикових швів, припиняли розповсюдження кільцеваням. Характер руйнування багатошарових труб при пневматичних випробуваннях відповідав теоретичним положенням і суттєво відрізнявся від аналогічних руйнувань труб з монолітною стінкою.

Спротив руйнуванню багатошарових труб найбільш повно характеризують пневматичні натурні випробування відрізків газопроводів довжиною 150 м при 100%-ному запасі повітря згідно методики, описаній нижче. Задача натурних випробувань відрізків газопроводів з багатошарових труб - перевірити умови гальмування розповсюдженню крихкого і в'язкого руйнувань.

Перший відрізок газопроводу призначався для дослідження ефективності гальмування багатошаровими трубами в'язко розповсюджуваного руйнування. Відрізок складався з двох центральних труб монолітного виконання із сталі контрольованої прокатки і прилеглих до них

багатошарових труб. Руйнування ініціювали із зони стику труб 1 і 2 (рис. 5). Другий випробуваний відрізок призначався для дослідження ефективності гальмування багатошаровими трубами крихко розповсюдженого руйнування. В цьому відрізку центральна труба 1 була виконана з нормалізованої сталі 14Г2АФ-У, руйнування якої при температурі -15°C повинно було мати крихкий характер. Схема випробуваного відрізка трубопроводу і характер його руйнування наведені на рис.6. В другому відрізку в багатошаровій трубі зі сторони розповсюдження руйнування була встановлена багатошарова оболонка – гаситель 3 спеціальної конструкції (розробка ІЕС ім.Є.О. Патона НАНУ). Обидва випробуваних відрізків були укладені в траншею без засипки ґрунтом.

В першому дослідному відрізку газопровода (див. рис. 5) в'язку тріщину ініціювали при температурі -15°C в трубі із сталі контрольованої прокатки при тиску повітря 7.6 МПа. З лівої сторони тріщина закольцювалася по стику з багатошаровою трубою, з правої – пройшла п'ять багатошарових оболонок і зупинилась, закріплюючись по шву між багатошаровою і монолітною трубами.

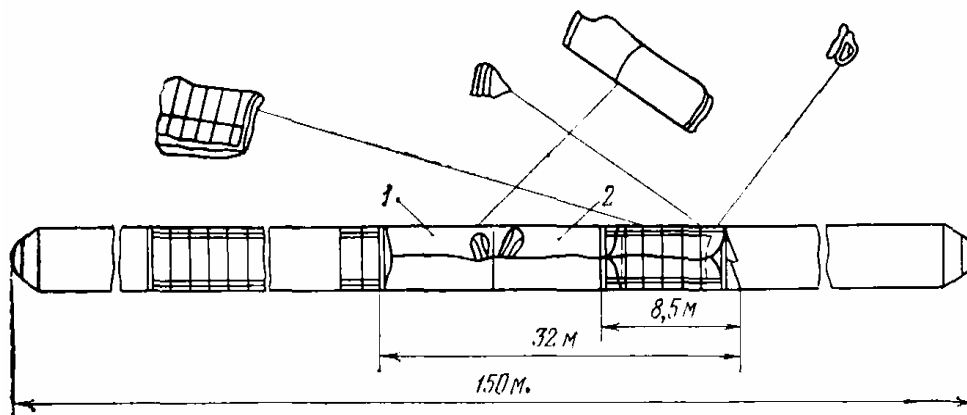


Рис. 5. Схема руйнування відрізка газопроводу довжиною 150 м із багатошарових труб розмірами 1420х(4.3х4) мм із сталі 09Г2СФ

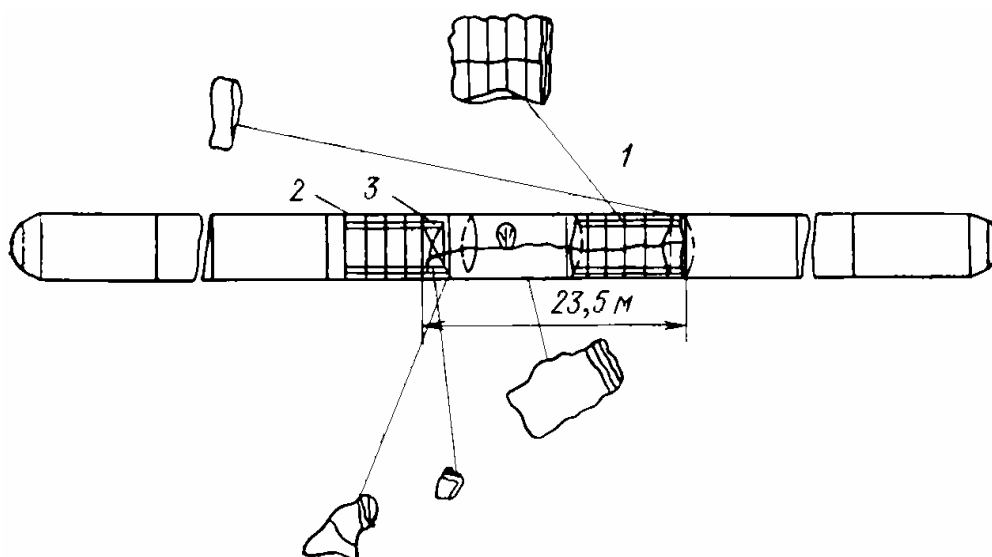


Рис. 6. Схема руйнування відрізка газопроводу довжиною 150 м із багатошарових труб розмірами 1420х(4.3х4) мм із сталі 09Г2СФ

При випробуванні другого відрізка крихка тріщина була ініційована в трубі з нормалізованої сталі 14Г2АФ-У при температурі -15°C і тиску повітря 7.5 МПа. Крихка тріщина,



Рис. 7. Фрагменти багатошарової котушки, яка служила в якості пастки для зупинки тріщин в газопроводі

розповсюджуючись по відрізьку газопроводу, пройшла повністю трубу з монолітною стінкою. З правої сторони тріщина розповсюдилась по багатошаровій трубі і закольцювалася на стику труби з монолітною стінкою. З лівої сторони тріщина була зупинена багатошаровою оболонкою – обмежувачем руйнувань на довжині 1.5 м. Загальна довжина руйнування багатошарової труби склала 9 м.

Приклади руйнувань експериментальних газопроводів із багатошарових труб, а також із застосуванням коротких вставок з багатошарових труб в якості пасток для зупинки тріщин, приведені на рис. 7.

Висновки

1. Багатошарові труби задовільно чинять спротив розповсюдженню крихкого і в'язкого руйнувань. Зупинка руйнувань відбулась в обох випробуваних відрізьках на довжині одної труби. При цьому крихкий характер руйнування при вході в багатошарову трубу відразу змінився на в'язкий.

2. В зв'язку з тим, що поперечна жорсткість багатошарових труб значно менше жорсткості таких же труб з монолітною стінкою, зусилля, рухаюче в'язке руйнування по газопроводу на ділянці багатошарових труб, відповідно нижче, чим на ділянці труб з монолітною стінкою. Зниження зусилля рухаючого руйнування

відбувається внаслідок різкого зменшення площі бортів труб, сприймаючих тиск газу і навантажуючих метал у вершині тріщини. Тому типовою схемою зупинки руйнування в газопроводі з багатошарових труб є перехід поздовжньо розповсюдженої тріщини в кільцеву із зупинкою руйнування по границі багатошарових і монолітних труб.

3. В процесі експериментів була також перевірена працездатність труб у випадку розгерметизації зовнішнього шару багатошарової труби, навантаженої внутрішнім тиском газу, що імітувало механічні пошкодження труби, встановлено, що в чотиришаровій трубі повний розрив зовнішнього шару не порушує її працездатність навіть при довжині розриву 700-900 мм, що в 3 рази більше критичної довжини тріщини для аналогічних труб з монолітною стінкою.

4. Таким чином, при забезпеченні герметичності внутрішнього шару багатошарової труби забезпечують задовільну працездатність газопроводів і ситуації, що вимагають раптової зупинки газопроводу при виникненні наскрізної тріщини, практично будуть виключені. Слід рекомендувати, щоб в багатошарових трубах загальна кількість шарів було не менше трьох. Значне збільшення числа шарів в багатошаровій трубі і зв'язане з цим зменшення товщини шару не рекомендується із-за зниження поперечної жорсткості, що ускладнює процес будівництва трубопроводів із-за можливості втрати стійкості чи злому труб в процесі монтажних і укладальних робіт.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Северинчик Н.А., Масник О.Т., Копей Б.В. Коррозия и коррозионная усталость подземного бурового оборудования // Львов:Вища школа:Изд-во при Львов ун-те. -144 с.
2. В.Д. Макаренко, С.І. Грачев, Н.Н. Прохоров і ін. Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири // Киев: Наукова думка. -1996.-549 с.
3. Андрейків О.Є., Никифорчин Г.М., Ткачов В.І. Міцність і руйнування металічних матеріалів і елементів конструкцій у водневомісних середовищах // Фізико-механічний інститут: - Під ред. В.В. Панасюка, НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. - Львів: Простір-М, 2001. - С. 248-286.
4. Ткачов В.І. Проблеми водневої деградації металів// Фіз.-хім. механіка матеріалів. -2000.--№4.—С. 7-14.
5. Швачко В.И. Макромеханические аспекты обратимой водородной хрупкости// Физ.-хим. механика материалов. - 2000.- №4.-С. 36-40.
6. Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І., Чернов В.Ю. Проблеми корозійної стійкості промислових трубопроводів // Нафтова і газова промисловість. -2002.-№6.-С. 42-44.

7. Самойленко М.І., Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем // Харків: ХНАМП. – 2009.-184 с.
8. Насоніна Н.Г., Антоненко С.Е. Аналіз пошкодженості водопровідних і каналізаційних мереж // Сучасне промислове та цивільне будівництво. -2019.-Том15.-№1.-С. 23-34.
9. Макаренко В.Д., Гоц В.І., Аргатенко Т.В. і ін. Дослідження аварійних трубопроводів// Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, вип.42. -2023.-С. 49-58.
10. Бриду А., Лафранс М., Прову И. Разработка новых сортов стали с повышенными характеристиками для транспорта кислого газа и нефти// Нефтегаз-Франция –ЮзичорАсье, 1986. -19 с.
11. Исследование отечественных и зарубежных низколегированных сероводородостойких сталей для нефтегазопроводного оборудования/А.И. Радкевич, Р.К. Мелехов, Я.И. Спектор, Р.В. Яценко// Межотраслевая науч.-конф. Конструкционные стали – прогрессивные процессы производства и эффективность применения. Днепропетровск, 1995. – С. 58-59.
12. Василенко І.І., Шульте О.Ю., Радкевич О.І. Вплив хімічного складу і технології виробництва сталей на їх чутливість до водневого тріщини утворення та сірководневого корозійного розтріскування // Фіз-хім механіка матеріалів. -1990.-№4.- С. 8-22.
13. Порівняльний аналіз корозійно-механічних властивостей вітчизняної трубної сталі 20ЮЧ з іноземними аналогами /О. Чапля, О. Радкевич, О. П'ясецький, Я. Спектор // Mashynoznavstvo. -1999.-№8.- С. 52-56.
14. Tyson W.R. Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - Pp. 441-443.
15. Максимов С.Ю., Кіндрачук М.В., Винников Ю.Л. і ін. Корозійні руйнування залізобетонних конструкцій гідротехнічних споруд // Київ: НУБіП України. – 2021.-292с
16. Макаренко В.Д., Коробко Б.О., Степова О.В. і ін. Методичний практикум експериментальних натурних випробувань труб.Монографія –Ніжин: НДУ ім.М.Гоголя. -2023. – 146 с.
17. Макаренко В.Д., Стогній О.В., ГоцВ.І. і ін. Натурні випробування трубопроводів. Монографія –Ніжин: НДУ ім. М.Гоголя. -2023. – 154 с.
18. Макаренко В.Д., Макаренко Ю.В. Експериментальні випробування трубопроводів. Монографія// Ніжин НДУ ім.М.Гоголя. -2020. – 543 с.

REFERENCES

1. Severinich N.A., Masnik O.T., KopejB.V. Korroziya I korrozionnaya ustalost' podzemnogo burovogo oborudovaniya (Corrosion and corrosion fatigue of underground drilling equipment) // L'vov:Vishchashkola: Izd-vopriL'vovun-te. -144s.
2. V.D. Makarenko, S.I. Grachev, N.N. Prokhorov i in. Svarka i korroziya neftegazoprovodov Zapadnoj Sibiri (Welding and corrosion of oil and gas pipelines in Western Siberia) //Kyev: Naukova dumka. -1996.-549 s.
3. Andreikiv O.Ie., Nykyforchyn H.M., TkachovB.I. Mitsnist I ruinovannia metalichnykh materialiv I elementiv konstruksii u vodnevomisnykh seredovyshchakh (Strength and failure of metallic materials and structural elements in hydrogen-containing environments) // Fizyko-mekhanichniy instytut: - Pid red. V.V. Panasiuka, NAN Ukrainy, Fizyko-mekhanichniy instytut im. H.V. Karpenka. - Lviv: Prostir-M, 2001. - S. 248-286.
4. TkachovV.I. Problemy vodnoyi dehratsii metaliv (Problems of hydrogen degradation of metals) // Fiz.-khim. mekhanikamaterialiv. -2000.--№4.—S. 7-14.
5. ShvachkoV.I. Makromekhanicheskie aspekty obratimoy vodorodnoy khрупkosti (Macromechanical aspects of reversible hydrogen embrittlement) // Fiz.-him. mekhanika materialov. -2000.- №4.-S. 36-40.
6. Makarenko V.D., KryzhanivskiyYe.I., Chernov V.Iu. Problemy korozii noi stii kosti promyslovykh truboprovodiv (Problems of corrosion resistance of industrial pipelines) // Naftovai hazovapromyslovist. -2002.-№6.-S.42-44.
7. Samoilenko M.I. Funktsionalna nadiinist truboprovodnykh transportnykh system (Functional reliability of pipeline transportation systems) // Kharkiv: KhNAMP. – 2009.-184 s.
8. Nasonina N.H., Antonenko S.Ie. Analiz poshkodzhenosti vodoprovodnykh i kanalizatsiinykh merezh (Analysis of damage to water and sewer networks) // Suchasne promyslove ta tsyvilne budivnytstvo. -2019.-Tom15.-№1.-S. 23-34.
9. Makarenko V.D., Hots V.I., Arhatenko T.V. i in. Doslidzhennia avariinykh truboprovodiv (Investigation of emergency)// Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki, vyp. 42. -2023.-S.49-58.
10. Bridu A., Lafrans M., Provu I. Razrabotka novykh sortov stali s povyshennymi kharakteristikami dlya transporta kislogo gaza i nefii (Development of new grades of steel with improved characteristics for the transport of acid gas and oil) // Neftegaz-Franciya –YuzichorAs'e, 1986. -19 s.
11. A.I. Radkevich, R.K. Melekhov, YA.I. Spector, R.V. Yacenko Issledovanie otechestvennykh i zarubezhnykh nizkolegirovannykh serovodorodostojkikh stalei dlia neftegazoprovodnogo oborudovaniya (Research of domestic and foreign low-alloy hydrogen sulfide-resistant steels for oil and gas pipeline equipment) // Mezhotraslevaya nauch.-konf. Konstrukcionnye stali – progressivnye processy proizvodstva i ehffektivnost' primeneniya. Dnepropetrovsk, 1995. – S.58-59.
12. Vasylenko I.I., Shulte O.Iu., Radkevych O.I. Vplyv khimichnoho skladu i tekhnologii vyrobnytstva stalei na yikh chutlyvist do vodnevoho trishchynoutvorennia ta sirkovodnevoho korozii noho roztriskuvannia (The influence of the chemical composition and production technology of steels on their sensitivity to hydrogen cracking and hydrogensulfide corrosion cracking) // Fiz-khim mekhanik amaterialiv. -1990.-№4.-S. 8-22.
13. O. Chaplia, O. Radkevych, O. Piasetskyi, Ya. Spector. Porivnialnyi analiz korozii no-mekhanichnykh vlastyivostei vitchyzniano i trubnoi stali 20YuCh z inozemnymi analohamy (Comparative analysis of corrosion and mechanical properties of domestic pipe steel 20Yuch with foreign analogues) // Mashynoznavstvo. -1999.-№8.- S. 52-56.
14. Tyson W.R. Hydrogen Embrittlement and Hydrogen Dislocation Interactions // Corrosion. - 1980. Vol. 36, No. 8. - Pp. 441-443.
15. Maksymov S.Iu., Kindrachuk M.V., Vynnykov Yu.L. i in. Korozii ni ruinovannia zalizobetonnykh konstruksii hidrotekhnichnykh sporud (Corrosion damage of reinforced concrete structures of hydraulic structures) // Kyiv: NUBiPUkrainy. – 2021.-292 s.

16. Makarenko V.D., Korobko B.O., Stepova O.V. i in. *Metodychnyi praktykum eksperymentalnykh naturnykh vyprobuvan trub (Methodical workshop on experimental full-scale pipe tests)* // Monohrafiia –Nizhyn: NDU im.M.Hoholia. -2023. – 146 s.
17. Makarenko V.D., Stohnii O.V., Hots V.I. i in. *Naturni vyprobuвання truboprovodiv (Field tests of pipelines)* // Monohrafiia – Nizhyn: NDU im. M.Hoholia. -2023. – 154 s.
18. Makarenko V.D., Makarenko Yu.V. *Eksperymentalni vyprobuвання truboprovodiv (Experimental testing of pipelines)* // Monohrafiia – Nizhyn NDU im.M.Hoholia. -2020. – 543s.

Стаття надійшла 19.02.2025

Макаренко В.Д., Гоц В.І., Максимов С.Ю., Макаренко Ю.В., Кислюк Д.Я.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ГІДРОПНЕВМАТИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ ТРУБОПРОВОДІВ З МОНОЛІТНИХ І КОМПОЗИТНИХ ТРУБ В ПОЛІГОННИХ (НАТУРНИХ) УМОВАХ

Доцільність скорочення паралельних прокладених ниток в одному напрямку, необхідність підвищення економічних показників транспортування газу обумовили швидке збільшення діаметра застосованих труб і величини робочого тиску; нинішній діаметр застосованих труб 1420 мм при тиску близько 7.5-8.0 МПа, як показують результати експериментальних досліджень, в тому числі полігонних випробувань, близький до оптимального. Все це сприяло тому, що в останні роки приділяється велика увага розробці нових конструкцій труб, зокрема використання при виготовленні трубопроводів багатoshарових труб з використанням поточної автоматизованої технології виробництва. Багатoshарові труби задовільно чинять спротив розповсюдженню крихкого і в'язкого руйнувань. Зупинка руйнувань відбулась в обох випробуваних відрізках на довжині однієї труби. При цьому крихкий характер руйнування при вході в багатoshарову трубу відразу змінився на в'язкий. В зв'язку з тим, що поперечна жорсткість багатoshарових труб значно менше жорсткості таких же труб з монолітною стінкою, зусилля, рухаюче в'язке руйнування по газопроводу на ділянці багатoshарових труб, відповідно нижче, чим на ділянці труб з монолітною стінкою. Зниження зусилля рухаючого руйнування відбувається внаслідок різкого зменшення площі бортів труб, сприймаючих тиск газу і навантажуючих метал у вершині тріщини. Тому типовою схемою зупинки руйнування в газопроводі з багатoshарових труб є перехід поздовжнього розповсюдження тріщини в кільцеву із зупинкою руйнування по границі багатoshарових і монолітних труб. В процесі експериментів була також перевірена працездатність труб у випадку розгерметизації зовнішнього шару багатoshарової труби, навантаженої внутрішнім тиском газу, що імітувало механічні пошкодження труби, встановлено, що в чотиришаровій трубі повний розрив зовнішнього шару не порушує її працездатність навіть при довжині розриву 700-900 мм, що в 3 рази більше критичної довжини тріщини для аналогічних труб з монолітною стінкою. Таким чином, при забезпеченні герметичності внутрішнього шару багатoshарової труби забезпечують задовільну працездатність газопроводів і ситуації, що вимагають раптової зупинки газопроводу при виникненні наскрізної тріщини, практично будуть виключені. Слід рекомендувати, щоб в багатoshарових трубах загальна кількість шарів була не менше трьох. Значне збільшення числа шарів в багатoshаровій трубі і зв'язане з цим зменшення товщини шара не рекомендується через зниження поперечної жорсткості, що ускладнює процес будівництва трубопроводів через можливість втрати стійкості чи зламу труб в процесі монтажних і укладальних робіт.

Ключові слова: багатoshарові труби, руйнування, надійність, технологія, зварюваність, полігонні випробування.

Makarenko V.D., Hots V.I., Maksymov S.Iu., Makarenko Yu.V., Kysliuk D.Y.

EXPERIMENTAL HYDROPNEUM TESTS OF PIPELINES MADE OF MONOLITHIC AND COMPOSITE PIPES IN POLYGON (NATURAL) CONDITIONS

The expediency of reducing the parallellaid the reads in one direction, the need to increase the economic indicators of gas transportation caused a rapid increase in the diameter of the used pipes and the value of the working pressure; the current diameter of the used pipes is 1420 mm at a pressure of about 7.5-8.0 MPa, as shown by the results of experimental studies, including field tests, close to the optimal. All this contributed to the fact that in recent years much attention has been paid to the development of new pipe designs, in particular the use of multilayer pipes in the manufacture of pipelines using current automated production technology. Multilayer pipes satisfactorily resist the spread of brittle and ductile fractures. The fractures topped in both tested sections along the length of one pipe. At the same time, the brittle nature of the fracture at the entrance to the multilayer pipe immediately changed to ductile. Due to the fact that the transverse stiffness of multilayer pipes is much lower than the stiffness of the same pipes with a monolithic wall, the force driving viscous fracture along the gas pipeline in the section of multilayer pipes is correspondingly lower than in the section of pipes with a monolithic wall. The reduction in the force of driving destruction occurs due to a sharp decrease in the area of the pipe sides, which perceive the gas pressure and load the metal at the crack tip. Therefore, a typical scheme for stopping fracture in a gas pipeline made of multilayer pipes is the transition of a longitudinally propagating crack in to an annular one with the stopping of fracture along the boundary of multilayer and monolithic pipes. During the experiments, the operability of the pipes was also checked in the case of depressurization of the outer layer of a multilayer pipe loaded with internal gas pressure, which simulated mechanical damage to the pipe. It was found that in a four-layer pipe, a complete rupture of the outer layer does not violate its operability even with a rupture length of 700-900 mm, which is 3 times greater than the critical crack length for similar pipes with a monolithic wall. Thus, while ensuring the tightness of the inner layer, multilayer pipes provides at is factory operability of gas pipelines and situations requiring a sudden stop of the gas pipeline in the event of a through crack will be practically excluded. It should be recommended that the total number of layers in multilayer pipes beat least three. A significant increase in the number of layers in a multilayer pipe and the associated reduction in layer thickness is not recommended due to a decrease in transverse stiffness, which complicates the process of pipeline construction due to the possibility of loss of stability or breakage of pipes during installation and laying work.

Key words: multilayerpipes, destruction, reliability, technology, weldability, field tests.

УДК 624.017

Макаренко В.Д., Гоц В.І., Максимов С.Ю., Макаренко Ю.В., Кислюк Д.Я. **Експериментальні гідропневматичні випробування трубопроводів з монолітних і композитних труб в полігонних (натурних) умовах** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірн.–К.: КНУБА, 2025.– Вип. 114– С. 44-53.

Приведений огляд методів і критеріїв експериментальних досліджень трубних сталей, які експлуатують під динамічним навантаженням. Обґрунтовано, що найбільш вірогідний матеріал досліджень відповідає експлуатаційним умовам, коли випробування крупно розмірних труб проводяться в натурних (спеціалізованих) умовах.

Лл. 7. Бібліогр. 18 назв.

UDC 624.017

Makarenko V.D., Hots V.I., Maksymov S.Iu., Makarenko Yu.V., Kysliuk D.Y. Experimental hydropneum tests of pipelines made of monolithic and composite pipes in polygon (natural) conditions // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2025. – Issue 114. – P. 44-53.

An overview of the methods and criteria for experimental studies of pipe steels operated under dynamic loading is presented. It is substantiated that the most reliable research material corresponds to operational conditions when tests of large-sized pipes are carried out in full-scale (specialized) conditions.

Fig. 7. Ref. 18.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор Київського національного університету і будівництва МАКАРЕНКО Валерій Дмитрович

Адреса робоча: 03037, Україна, м.Київ, просп. Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел +38(066) 747 67 90;

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9178-9657>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор Київського національного університету і будівництва Гоц Володимир Іванович

Адреса робоча: 03037, Україна, м.Київ, просп. Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

Тел +38(044) 248 30 16

E-mail: gots.vi@knuba.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-1609>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України Максимов Сергій Юрійович

Адреса робоча: 11, вул. Казимира Малевича, Київ, 03650

E-mail: MaksymovSY1954@nas.gov.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): магістерка університету Манітоба (Канада) Макаренко Юлія Валеріївна

Тел: +38(066) 747 67 90

E-mail: green555tree@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1252-4231>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент кафедри будівництва та цивільної інженерії Луцького національного технічного університету Кислюк Дмитро Ярославович

Адреса робоча: 43018, Україна, м. Луцьк Волинська обл., вул. Львівська, 75, Луцький національний університет

Тел.: +38(095)-395-49-00

E-mail: d.kyslyuk@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5794-8466>