

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

УДК 621.643:[622.691:620.191.33-027.45]

Й. Й. ЛУЧКО*

* Кафедра «Мости і тунелі», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 033 18 36, ел. пошта lychko.diit@mail.ru

МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ГАЗОПРОВОДУ НА МІЦНІСТЬ, ВТОМНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ

Мета. Метою роботи є аналіз методів розрахунку та виконати оцінку міцності і втомної тріщиностійкості газопроводу тривалої експлуатації. **Методика.** На основі аналізу сучасних методів розрахунку магістральних трубопроводів на міцність і довговічність та на цій основі сформульована методика комплексної оцінки роботоздатності досліджуваного етиленпроводу, як з позицій класичних критеріїв міцності, так і підходів механіки втомного руйнування, які дозволяють врахувати циклічний характер зміни навантажень у трубопроводі. **Результати.** Одержані результати розрахунків міцності і втомної тріщиностійкості газопроводу тривалої експлуатації за класичними критеріями міцності та оцінки роботоздатності трубопроводів з врахуванням їх дефектності на основі механіки руйнування. Отримані експериментальні дані міцності і тріщиностійкості трубної сталі і її зварних з'єднань газопроводу. На основі комплексу експериментів побудована діаграма втомного руйнування газопроводу. **Наукова новизна.** Автором вперше проведені багатоваріантні експериментальні і теоретичні розрахунки міцності та втомної тріщиностійкості трубної сталі тривало експлуатованих потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів. **Практичне значення.** Одержані результати міцності і втомної тріщиностійкості дозволили удосконалити методичні засади експрес методу оцінки роботоздатності потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів.

Ключові слова: магістральний трубопровід; твердість металу; оцінка роботоздатності; трубна сталь; розрахункова і допустимі напруження; коефіцієнт запасу міцності

Вступ

Магістральні газопроводи (МГ) відносяться до інженерних споруд підвищеної відповідальності. Змінні високі тиски, велика протяжність трас, складні природно-гідрологічні умови їх проходження та значні економічні втрати при аваріях МГ – все це дає підстави на підвищені вимоги до їх міцності, надійності та довговічності. Досвід тривалої експлуатації потенційно-небезпечних ділянок трубопровідних систем, таких як магістральні газопроводи, вказує на важливість урахування особливостей перерозподілу їх сумарних напружень і деформацій у місцях дефектних ділянок. Сучасні можливості розвитку інженерних розрахунків стосовно забезпечення надійної і безаварійної експлуатації відповідальних вузлів і елементів трубопровідних систем вказує, що злободенною залишається проблема їх контролю міцності та втомної тріщиностійкості і довговічності та водночас забезпечення таких умов перебігу експлуатації, за яких неможливо виникнення (з погляду руйнування) станів МГ. Тому узагальнення досвіду та створення ефективної методики оцінки міц-

ності і втомної тріщиностійкості та формулювання висновків, щодо подальшої експлуатації чи способів ремонту тривало експлуатованих ділянок магістральних газопроводів (трубопроводів) не втрачає актуальності і сьогодні.

Значна частина розгалуженої мережі магістральних трубопроводів України перебуває в експлуатації більше 30 років [5, 7, 9]. Зі збільшенням термінів їх експлуатації все актуальнішою стає проблема ефективної та безперервної роботи трубопровідного транспорту, яка забезпечується організацією періодичної технічної діагностики стану елементів трубопроводів та ремонту в місцях виявлених недопустимих дефектів [1, 2, 4, 8, 12, 14, 15, 18, 20]. В кожному конкретному випадку допустимість виявленого дефекту вимагає комплексного підходу та відповідних обґрунтувань щодо проведення ремонтно-відновлювальних заходів. Однією з важливих складових такого підходу є визначення напруженого стану трубопроводів в конкретних умовах експлуатації, особливо в зонах зварних з'єднань, в яких до напружень, зумовлених дією силових факторів, додаються ще і залишкові

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

технологічні напруження, та оцінка їх впливу на міцність та довговічність ділянок труб з дефектами [3, 5, 6, 10, 11, 13, 16, 17, 19]. Нижче наведено результати експериментальних досліджень матеріалів газопроводу на міцність і втомну тріщиностійкість та методики розрахунку, і їх аналіз.

Мета

Метою роботи є оцінка міцності і втомної тріщиностійкості газопроводу тривалої експлуатації та аналіз методів розрахунку.

Методика

Розрахунки за класичними критеріями міцності. Значний період з 1979 р. були діючими нормативні рекомендації з проведення ремонтно-відновлювальних робіт на газопроводах [5] не допускали їх експлуатацію при наявності наскрізних дефектів труб.

Ділянки із такими дефектами підлягають видаленню, а на їх місце вварюють врізані куски труб. Сама по собі ця операція дуже трудомістка і зв'язана із значними екологічними втратами.

Розрахунок трубопроводів на міцність і довговічність є з однією із найважливіших ланок у формуванні і забезпеченні надійності трубопроводних систем [1, 2]. Тому розвитку і вдосконаленню методів з рахунку постійно надається підвищена увага. На даний час як на Україні, так і в інших країнах існує ряд нормативних документів по розрахунках на міцність, які відображають сучасний рівень знань і технічних можливостей в цій галузі. Так, з січня 1975 р. введено в СНиП II-45-75 по розрахунку і проектуванню магістральних трубопроводів, який замінив діючий раніше СНиП II-Д. 10-62.

Цей нормативний документ узаконив розрахунок на міцність за граничним станом трубопроводу на основі границі міцності матеріалу. В цьому випадку умова міцності вибирається у вигляді

$$\sigma_p \leq \psi[\sigma], \quad (1)$$

де σ_p – максимальні сумарні робочі напруження від всіх діючих силових факторів; $[\sigma]$ – розрахункове допустиме значення напружень для

матеріалу труби; ψ – коефіцієнт, який враховує двохосовий напружений стан.

В свою чергу допустимі напруження визначаються за формулою

$$[\sigma] = \frac{\sigma_B m}{K_1 K_2}, \quad (2)$$

де σ_B – границя міцності матеріалу згідно державних стандартів і технічних умов; m – коефіцієнт умов роботи трубопроводу; K_1 – коефіцієнт безпеки; K_2 – коефіцієнт надійності.

Коефіцієнт безпеки по матеріалу відображає можливе зменшення границі міцності труб порівняно з його нормативним значенням, можливе зменшення товщини стінки порівняно з номінальною і надійність конструкції труби. Коефіцієнт умов роботи враховує можливу невідповідність вибраної розрахункової схеми реальній конструкції, зокрема особливості взаємодії трубопроводу з зовнішнім середовищем. Окрім того, цей коефіцієнт відображає вплив наслідків руйнування трубопроводів на здоров'я людей, а також на вартість виконання ремонтно-відновлювальних робіт.

Коефіцієнт надійності вперше введений в норми проектування трубопроводів в 1975 році з метою врахування додаткових факторів, зв'язаних із збільшенням діаметрів споруджуваних трубопроводів і робочого тиску продукту. При визначенні сумарних напружень величина σ_p у співвідношенні (1) враховують напруження від всіх видів навантаження, які виникають при спорудженні, випробуванні і експлуатації трубопроводів. Основне навантаження – робочий тиск продукту, який транспортується. При розрахунку необхідно врахувати можливість збільшення цього тиску, вводячи для його оцінки коефіцієнт перенавантаження.

Наступним суттєвим фактором виникнення напружень є температурний перепад в металі стінок труби, який визначається в залежності від температури газу і ґрунту (для підземних трубопроводів) або зовнішнього повітря (для надземних). При розрахунку надземних трубопроводів слід враховувати також вагу труби і продукту.

Крім вказаних факторів, які є основними і діють на будь-якій ділянці трубопроводу, в розрахункові схеми вводяться і інші навантаження в залежності від категорії траси, схеми і ме-

тодів прокладки трубопроводу, природно-кліматичних умов експлуатації і т. ін. Так, при надземній прокладці трубопроводу, характерній для вічномерзлих ґрунтів і різних типів переходів через природні і штучні перешкоди, на нього додатково будуть діяти: реакції опор, снігове навантаження; вітрове навантаження (статичне за рахунок аеродинамічного тиску і динамічне за рахунок взаємодії поривів вітру і зриву вихорів під час обдування труби потоком повітря при певній швидкості вітру).

Для всіх інших схем прокладки необхідно враховувати сили, які виникають при засипці ґрунтом, і реакцію основи траншеї. Ці сили різні при прокладанні трубопроводу на косогорах, в горах, на рівнинах з низьким і високим рівнем ґрунтових вод і т.п.

На ділянках трубопроводів, які прокладені на болоті, або на заболочених місцях з високим рівнем ґрунтових вод до вказаних навантажень необхідно додавати ще виштовхувальну силу. На трубопровід прокладений по руслі річки, крім цього діють ще і сили потоку води.

Різні навантаження на магістральні трубопроводи виникають при їх прокладці в горах, оскільки в цьому випадку на напружено-деформований стан впливають як спосіб прокладки (зверху вниз чи знизу вгору) так і властивості ґрунту, який може сприймати повністю або лише частково вагу труби, продукту і засипки. Крім цього, на практиці можливі і інші навантаження, які виникають в особливих випадках (зсуви, вимивання або вивітрювання ґрунту з-під труби і т. ін.).

Нормативний розрахунок за співвідношенням (1) має основне значення для вибору товщини стінки трубопроводу і встановлення допустимої величини тиску продуктів перекачки. Проте він не дозволяє з достатньою надійністю прогнозувати очікуваний ресурс трубопроводу, оскільки не враховує багатьох факторів, які притаманні реальному процесу навантаження матеріалу в стінці трубопроводу при його експлуатації. Одним із найважливіших таких факторів є циклічність навантаження.

Основні несучі елементи магістральних трубопроводів в процесі експлуатації піддаються впливу змінних у часі навантажень. Причиною цих циклічних напружень може бути робота насосних і компресорних станцій; регулярна

зміна температури; вітрове навантаження для надземних трубопроводів і течії води для прокладених по дну рік.

Відомо, що опір матеріалу діючим навантаженням, які систематично змінюють свою величину, суттєво відрізняється від опору цього ж матеріалу статичним навантаженням, причому при циклі ці руйнування відбуваються при значно менших напруженнях, ніж при статиці.

Зниження міцності матеріалу при змінних напруженнях називається втотою матеріалу, а його здатність чинити опір руйнуванню і є основною характеристикою втомної міцності є границя витривалості σ_R , за яку приймається найбільша величині періодичного циклічного напруження, якому матеріал може протидіяти практично безмежно довго без появи втомних тріщин, чи будь-яких інших ознак втомного руйнування. Порівнюючи рівень діючих в конкретній деталі напружень σ_p з границею витривалості σ_R визначають коефіцієнт запасу втомної міцності:

$$\eta = \frac{\sigma_p}{\sigma_R}. \quad (3)$$

Стосовно до трубопроводів оцінка запасу втомної міцності ускладнюється тією обставиною, що в трубі виникає двохосний напружений стан. В цих умовах прийнято використовувати розрахункову залежать Гафа і Поларда, яка має вигляд

$$\frac{1}{\eta^2} = \frac{1}{\eta_\sigma^2} + \frac{1}{\eta_\tau^2}, \quad (4)$$

де η – шуканий коефіцієнт запасу втомної міцності; η_σ – запас втомної міцності лише при нормальних напруженнях; η_τ – лише при дотичних.

Із умов експлуатації іноді наперед відомо, що деталь за час своєї роботи повинна прийняти значно менше число циклів, ніж те, що відповідає границі витривалості. У цьому випадку більш вигідно вести розрахунок на потрібне число циклів, а не виходячи із границі витривалості. При цьому допустимі напруження знаходять наступним чином. По діаграмі втоми матеріалу (залежності числа циклів до руйнування від величини діючих напружень) за заданим значенням циклів навантаження N знаходять відповідне граничне значення цю величини

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

ну можна розглядати як границю витривалості на обмеженій кількості циклів навантаження. Далі допустиме напруження визначають за формулою:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{sp}}{\eta}, \quad (5)$$

де η – прийнятий коефіцієнт втомної міцності.

Іншим варіантом критерій довговічності, особливо для випадків, коли навантаження повільно змінюються з часом і має місце малоциклова втома, є співвідношення

$$\tau = c\sigma^{-B} \exp\left(\frac{u}{kT}\right), \quad (6)$$

де τ – час експлуатації до руйнування; c і B – характеристики матеріалу; u – енергія активації; k – постійна Больцмана; T – експлуатаційна температура (за абсолютною шкалою); σ – діючі напруження.

Оцінка роботоздатності трубопроводів з врахуванням їх дефектності на основі механіки руйнування. Розглянуті вище підходи до розрахунків на міцність, які базуються на принципах граничного навантаження або допустимих напружень, Безумовно, не вичерпують всіх аспектів можливого руйнування трубопроводів. Зокрема, відомо, що магістральні трубопроводи в ряді випадків можуть вийти з ладу в результаті лавинного (з швидкістю 0,1-0,4 – швидкості звуку в металі) поширення в них тріщин, причому при номінальних напруженнях, значно менших, ніж допустимі (в сенсі розглянутих вище критеріїв статичної і циклічної міцності). Це явище зв'язано з крихким руйнуванням матеріалу. Воно проявляється тоді, коли в конструкції є концентратори напружень, а в самому матеріалі які-небудь дефекти, але система навантаження не дозволяє діючим напруженням релаксувати в момент початку росту тріщини, яка утворюється. Іншими словами, не кожний дефект (в т.ч. і тріщина) приводить до негайного руйнування, оскільки більшість матеріалів має здатність пластично деформуватися в зоні максимальної концентрації напружень навколо дефекту. Цю здатність звичайно ототожнюють з високою тріщиностійкістю матеріалу.

Якщо дефект досить великий і несприятливим чином орієнтований, а локальне напружен-

ня, в якому він знаходиться, має високий рівень, то дефект може викликати нестабільне руйнування, яке швидко розвивається. В цьому випадку можна говорити, що дефект являється критичним.

Дефекти, близькі до критичних, можуть виникати в магістральних трубопроводах уже на стадії виготовлення або монтажу. Типовими дефектами в цьому випадку є дефекти зварки, а також механічні пошкодження що виникають при вантаженні, транспортуванні і зварці труб. Якщо частина із цих дефектів виявиться критичною, то руйнування трубопроводу відбудеться уже при першому навантаженні під час випробувань. Якщо ж дефекти є докритичними, то вони можуть бути пропущені при проведенні неруйнівного контролю труб і тим більше не будуть виявлені при прикладанні пробного тиску. В певних умовах такі дефекти можуть навіть не порушити нормальних умов експлуатації трубопроводу. Тим не менше, існує небезпека, що вони будуть рости під впливом втоми і корозії і, досягнувши через деякий час критичних розмірів, приведуть до остаточного руйнування.

Розглянуте явище безумовно свідчить про недостатність класичних методів розрахунку трубопроводів на міцність лише по пружному чи пластичному стану і необхідність доповнення їх новими методами розрахунку, які враховують закономірності зародження і росту тріщин а також нові характеристики, що відображають властивості матеріалу на цій стадії руйнування.

Методологічною основою такого розрахунку є механіка руйнувань - порівняно новий напрям в науці про міцність матеріалів, який бурхливо розвивається останнім часом [12]. Основні положення механіки руйнування, а також особливості її застосування до проблем, зв'язаних з оцінкою працездатності трубопроводу достатньо детально закладені в попередніх звітах [9]. Тому тут зупинимося лише на загальній схемі цього розрахунку, маючи на меті в наступних розділах викласти конкретні результати, отримані при реалізації цієї схеми.

Отже, розрахунок міцності і довговічності трубопроводу на основі механіки руйнування включає в себе такі основні етапи:

- 1) аналіз умов навантаження і характеру пошкодження етиленопроводу на досліджуваній ділянці;
- 2) розрахунок напружено-деформованого стану труби в зоні дефекту;
- 3) експериментальне визначення характеристик опору руйнуванню тріщиностійкості матеріалу труб;
- 4) оцінка запасу міцності і залишкового ресурсу етиленопроводу на пошкодженій ділянці труби.

Завдання першого етапу полягає у отриманні необхідної вихідної інформації для розрахунку. В першу чергу це дані про умови навантаження трубопроводу з врахуванням всіх діючих силових факторів. Причому для прогнозування ресурсу трубопроводу важливо знати не тільки більш несприятливе поєднання цих факторів (критичний стан), але і характер їх зміни в часі (циклічність навантаження). Розв'язок цієї задачі здійснюється на основі традиційних розрахункових методів [1, 12]. Виходячи із реальної ситуації, розробляється розрахункова схема, яка найбільш повно моделює характерні для даної ділянки особливості навантаження, в рамках цієї схеми визначаються значення всіх силових факторів (внутрішній тиск, розтягуючі і згинаючі зусилля, температурні напруження і т.п.) і по них розраховуються номінальні напруження, до виникають в стінці труби. Вихідні дані повинні містити також по можливості найбільш повну характеристику пошкодження або дефекту труби. Отримання інформації в цьому напрямі базується насамперед на безпосередньому обстеженні пошкодженої ділянки трубопроводу. В ході обстеження встановлюється характер пошкодження (свищі, тріщини, корозійні язви, розшарування матеріалу і т.п.) і найбільш ймовірні причини його виникнення (дефекти зварних швів, механічні пошкодження труб, зовнішня чи внутрішня корозія і ін.). Особливе значення має надійне визначення розмірів дефекту, зокрема, видовжених дефектів – положення їх кінців. Необхідно провести заміри товщини стінки труби як безпосередньо в зоні дефекту, так і в його околі, з метою виявлення можливих відхилень товщини від номінальних значень, що може стати причиною перенавантаження труби. Слід зафіксувати також орієнтацію дефекту по відношенню до розмірів зварних

швів: поздовжніх, зварених в заводських умовах і поперечних (монтажних). Необхідність цього викликана тим, що міцнісні характеристики і тріщиностійкість зварних швів відрізняється від аналогічних значень для основного металу. Окрім того, залишкові напруження, які виникають при зварці, можуть внести додатковий вклад в напруження від зовнішніх зусиль.

Дані, які отримані на першому етапі, складають основу розрахункової схеми, що зводить визначення міцності етиленопроводу до розв'язку деякої модельної задачі для труби (циліндричної оболонки) з конкретним дефектом і при заданих умовах навантаження. Другий етап розрахунку полягає в дослідженні напружено-деформованого стану в околі дефекту і визначенні розрахункових параметрів, які контролюють цей стан (коефіцієнтів інтенсивності напружень, розкриття тріщини і ін.). Для дефектів достатньо простої конфігурації в літературі відомі розв'язки в замкнутому вигляді (тобто записані в вигляді конкретних аналітичних співвідношень). Зокрема, для найбільш типового витягнутого дефекту довжиною $2l$, розміщеного в поздовжньому перерізі труби величина коефіцієнта інтенсивності напружень у відповідності з даними [7] визначається залежністю:

$$K_i = \sqrt{\pi l} \cdot \left\{ \left[\sigma_p \left(1 + \frac{5\pi}{64} \chi \right) + \sigma_m \frac{\sqrt{1-\mu^2} \chi^2}{\sqrt{3(3+\mu)}} \right] \cdot \left[\frac{5+37\mu}{96(1+\mu)} + \frac{1+5\mu}{16(1-\mu)} \left(0,577 + \ln \frac{\chi}{4} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

де $\chi^2 = 12(1-\mu^2)l^4 / R^2h^2$; R – радіус труби;

h – товщина стінки; μ – коефіцієнт Пуассона; σ_p – розтягуючі напруження; σ_m – згинаючі напруження.

Для тонкостінної труби під дією внутрішнього тиску силові розтягуючі напруження мають значення

$$\sigma_p = \rho \frac{R-h}{h}; \quad \sigma_m = 0. \quad (8)$$

Формула (7) набуває вигляду

$$K_1 = \rho \sqrt{\pi l} \frac{R-h}{h} \left(1 + \frac{5\pi}{64} \chi^2 \right). \quad (9)$$

У більш складних випадках, особливо при визначенні характеристик нелінійної механіки руйнування (розкриття тріщини), відомі методи розв'язку вимагають, як правило, додаткової числової реалізації при заданих значеннях розрахункових параметрів.

Наступний (третій) етап розрахунку полягає у експериментальному визначенні характеристик опору руйнуванню матеріалу труби. Методики і результати цих досліджень викладені в наступній главі цього звіту. Тут лише відмітимо, що основна трудність досліджень полягає в тому, щоб при визначенні вказаних параметрів максимально врахувати реальні умови навантаження матеріалу в трубопроводі, приймаючи до уваги всі фактори, які можуть вплинути на процес розрахунку тріщин. Найбільш суттєвими такими факторами є асиметрія циклу навантаження, частота, температура зовнішнього середовища і ін. При плануванні експерименту для вказаних параметрів вибираються такі значення, які відповідають експлуатаційним умовам.

При випробовуванні високопластичних матеріалів характеристики тріщиностійкості можуть залежати також і від розмірів зразків. Як правило, найбільш суттєве значення в цьому випадку має товщина зразка. Неконтрольованого впливу цього фактора можна позбутися, або хоча б значно зменшити його, якщо зразки для випробовувань вирізати безпосередньо із відрізків труб даного сортаменту, приймаючи товщину зразка рівною товщині труби. В цих умовах вдається в процесі експерименту моделювати особливості руйнування труб, зокрема, розвиток пластичних зон при рості тріщини.

Необхідно також врахувати, що матеріал трубопроводів, який довгий час знаходився в експлуатації, змінює свої початкові фізико-механічні властивості. Під дією статичних і циклічних навантажень відбувається деформаційне старіння трубних сталей, яке проявляється в локальному окришенні матеріалу а, отже, в зниженні стійкості труб до крихкого руйнування. Саме цим явищем насамперед пояснюється наростаюче збільшення аварійних пошкоджень трубопроводів із збільшенням терміну їх експлуатації. Тому для отримання об'єктивних даних про реальні характеристики трубної сталі

на даний момент, бажано проводити випробування на зразках, вирізаних безпосередньо із досліджуваного трубопроводу.

Отримані на попередніх етапах розрахунку дані про експлуатаційну навантаженість і дефектність трубопроводу, розрахункові залежності для визначення параметрів руйнування і значення характеристик рідностійкості трубних сталей дозволяють перейти безпосередньо до дослідження несучої здатності і довговічності трубопроводу. Для цього необхідно насамперед оцінити небезпечність розглядуваного поєднання, тобто встановити умови, при яких можливий його перехід; нестабільний стан (остаточне руйнування). У відповідності з критеріями лінійної механіки руйнування така ситуація наступить, коли величина коефіцієнту інтенсивності напружень у вершині дефекту досягне критичного для даного матеріалу значення:

$$K_1 = K_{1c}. \quad (10)$$

Використовуючи цю залежність, можна знайти значення руйнуючого тиску P , яке відповідає даному розміру дефекту l , а також визначити коефіцієнт запасу міцності трубопроводу за умовою статичного граничного навантаження:

$$n_p = \frac{P^*}{P_{max}}, \quad (11)$$

де P_{max} – максимальний робочий тиск газу.

Якщо то це значить, що трубопровід ще зберігає несучу здатність, проте його руйнування може відбутися через деякий час внаслідок підростання дефекту. В цьому випадку важливе значення має оцінка періоду стійкого (стабілізованого) підростання дефекту до досягнення ним критичного розміру. Для розв'язку цієї задачі використовується диференціальне рівняння кінетики втомного руйнування, яке має вигляд [12]:

$$\frac{dl}{dN} = v(K_1), \quad (12)$$

де $v(K_1)$ – залежність швидкості росту тріщини від величини коефіцієнта інтенсивності напружень у її вершині, яка для даного матеріалу і даних умов навантаження визначається кінетичною діаграмою втомного руйнування; N – число циклів навантаження; l – біжучий, а l_0 –

початковий розмір дефекту.

Інтегруючи рівняння (12), отримаємо для розрахунку числа циклів навантаження до повного руйнування, таку залежність:

$$N_* = \int_{l_0}^{l_*} \frac{dl}{v(K_1)}, \quad (13)$$

де l – критичний розмір дефекту, який визначається із критичного співвідношення

$$K_1 = (l_* P_{\max}) = K_{1e}. \quad (14)$$

Очевидно, що значенню N відповідає час

$$\tau_* = \frac{N_*}{\omega}, \quad (15)$$

де ω – середня частота пульсацій тиску при даному режимі перекачки газу.

Значення τ_* визначає залишковий ресурс трубопроводу, тобто час протягом якого даний дефект ще не приведе до повного обриву.

Результати

Міцність і тріщиностійкість трубної сталі і її зварних з'єднань. Для прогнозування довговічності етиленопроводу необхідно мати достовірні дані про властивості міцності трубної сталі і її зварних з'єднань при експлуатаційному навантаженні. Ці властивості характеризуються такими основними параметрами:

- механічними характеристиками (границя міцності, границя текучості, відносне видовження та звуження);
- кривою втомної міцності (діаграмою Велера) і параметрами, що її описують;
- кінетичною діаграмою втомного руйнування, яка відображає закономірності росту втомних тріщин і відповідними характеристиками циклічної тріщиностійкості.

Для визначення вказаних параметрів і був реалізований комплекс експериментальних досліджень. Випробування проводили з фрагмента труби, який використовувався при ремонті етиленопроводу Калуш - границя Угорщини на зразках, вирізаних безпосередньо із переданого замовником матеріалу труби - сталь 20.

Використовувалися три типи зразків:

- циліндричні ($d_o = 5$ мм) – для дослідження механічних характеристик при статичному розтягу;
- плоскі з робочою частиною (5×10 мм) - для випробувань на втому;
- квадратні (компактні) розміром 30×30×5 мм – для дослідження на циклічну тріщиностійкість.

Втомні характеристики визначали як для основного матеріалу, так і для зони термічного впливу зварного шва, яким приварений бандаж до основної труби. Для імітації цього шва на поверхню труби приварювали пластину, попередньо вирізану із цієї труби, після чого пластину знову зрізали і вирізали зразки таким чином, щоб робоча частина співпадала з зоною шва. Технологічна карта розкрою труби на зразки представлена на рис. 1.

Механічні і втомні характеристики трубної сталі. Механічні характеристики статичної міцності сталі визначали на гладких циліндричних зразках (рис. 2). У відповідності з вимогами ГОСТ 1497-84 [4].

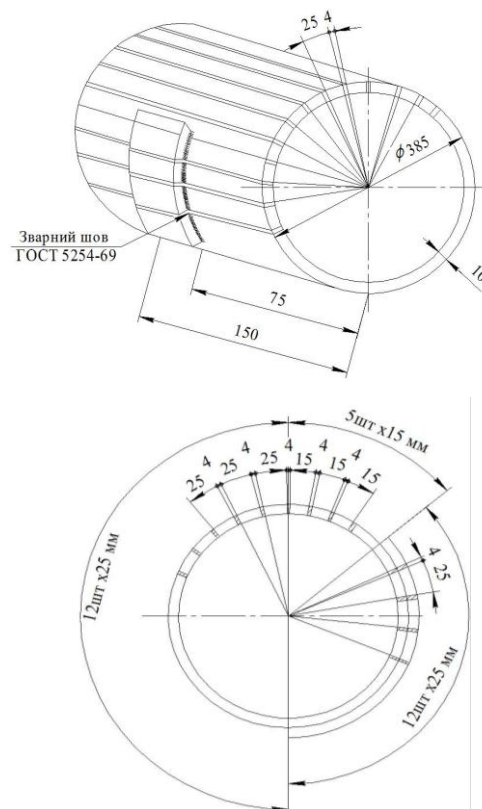


Рис. 1. Карта розкрою труби на зразки

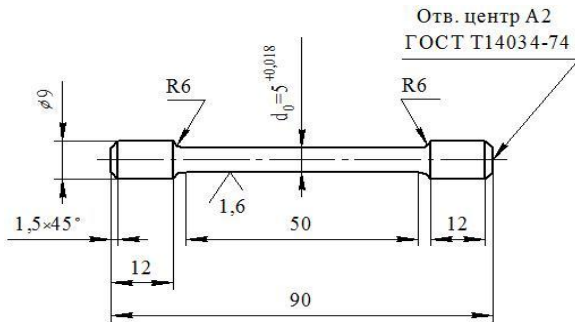


Рис. 2. Циліндричний зразок для випробування на статичний розтяг

1. Для навантаження зразків використовували розривну машину ГР-100 обладнану пристроєм для запису діаграми розтягу. Розміри зразків до і після розриву заміряли мікрометром та штангенциркулем. По даних випробувань трьох зразків отримано такі характеристики:

- границя міцності σ_B – 460 МПа;
- границя текучості σ_T – 300 МПа;
- відносне видовження $\delta = 32\%$;
- відносне звуження $\psi = 60\%$.

Випробування на втомну міцність проводили на плоских зразках (тип IV згідно ГОСТ 2860-65) з прямокутним перерізом $b \times t = 10 \times 5$ мм (рис. 3).

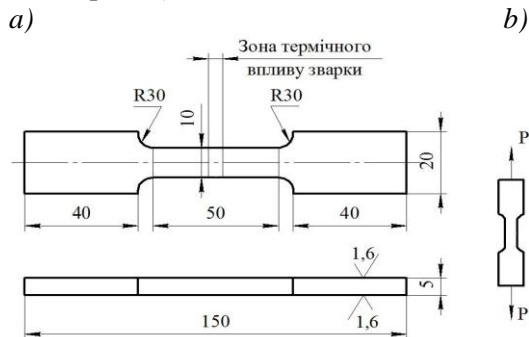


Рис. 3. Зразок для випробувань на втому

Навантаження зразків по схемі осевого розтягу здійснювали на універсальній машині УРС-20-20, яка забезпечує циклічне навантаження з даною частотою, амплітудою і асиметрією і обладнана апаратурою для контролю параметрів навантаження і кількості циклів навантаження. Випробування проводили при законостійному циклі навантаження з асиметрією $R = 0,1$ і з частотою 20 Гц. Кожний зразок навантажували безпосередньо до руйнування, або до базового числа циклів $N = 10^7$. Напруження

для першого зразка приймали рівним границі текучості $\sigma = 300$ МПа. Величину напружень у наступних зразках вибирали залежно від довговічності попередніх з поступовим зменшенням амплітуди до границі втоми σ_R .

Результати випробувань приведені в таблиці 1. На основі цих даних побудована діаграма втоми (крива Велера) (рис. 4), яка відображає залежність числа циклів навантаження до руйнування зразка від рівня прикладених до нього напружень.

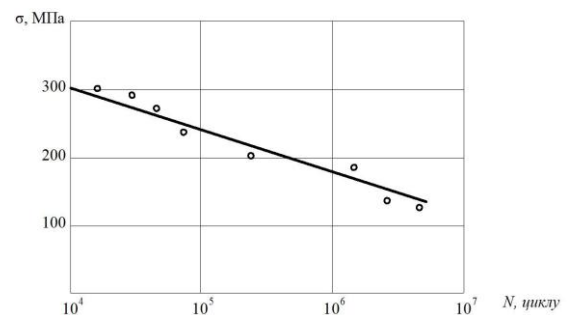


Рис. 4. Діаграма втоми

Циклічна тріщиностійкість матеріалу етиленпроводу. Сутність випробувань по визначенню характеристик циклічної тріщиностійкості сталей полягає у послідовному вимірюванні при заданих параметрах циклу навантаження зразка розміру ростучої тріщини і числа циклів навантаження [11].

На основі отриманих даних:

- будують графіки росту тріщини, тобто залежності її довжини від числа циклів навантаження;

- визначають швидкість росту тріщини

$$V = \frac{dl}{dN} = \frac{\Delta l}{\Delta N}$$

як середній приріст її довжини за один цикл при заданих умовах випробування;

- встановлюють залежність швидкості росту тріщини від величини коефіцієнту інтенсивності напружень, яка характеризує локальний напружено-деформований стан біля вершини тріщини і визначають параметри цієї залежності – характеристики циклічної тріщиностійкості.

Залежність швидкості тріщини від найбільшого за цикл коефіцієнту інтенсивних напружень $K_{I_{max}}$ або його розмаху ΔK_I представляє собою кінетичну діаграму втомного руйнування, яка дає найбільш повну інформацію про

здатність матеріалу чинити опір поширенню втомних тріщин. По діаграмі встановлюються такі основні характеристики циклічної тріщиностійкості:

- пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень K_m - максимальне значення найбільшого коефіцієнту напружень циклу, при якому тріщина не розвивається на протязі даного числа циклів навантаження;
- критичний коефіцієнт інтенсивності K_{fc} - значення K_{max} , при якому наступає злом зразка;
- параметри залежності $V = CK_1^n$, що апроксимують середню ділянку діаграми.

Для побудови кінетичної діаграми втомного руйнування трубної сталі етиленопроводу використовувалася силова схема розтягу компактного зразка з боковою тріщиною (рис. 5). Дослідження проводили на випробувальній машині ІДМПу - 10, обладнаною системою вимірювання для контролю найбільшого і найменшого значення навантаження в циклі і кількості циклів навантаження. Довжину тріщини вимірювали по її сліду на поверхні зразка катетометром КМ-8 з точністю 0,01 мм.

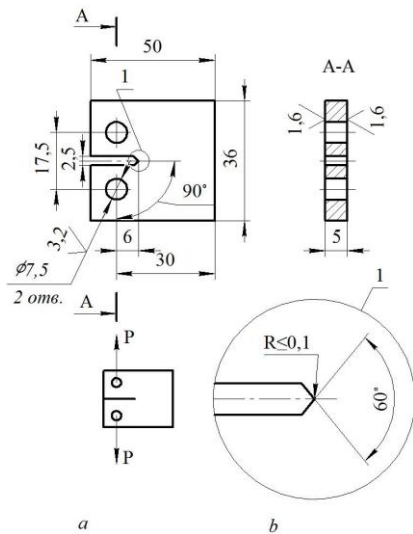


Рис. 5. Компактний зразок для випробувань на циклічну тріщиностійкість

За даними послідовного вимірювання довжини втомної тріщини, навантаження P на зразку і числа циклів навантаження N визначали:

- величину коефіцієнта інтенсивності напружень

$$K_{I_{max}} = \frac{P\sqrt{\varepsilon}}{t\sqrt{b}} \psi(\varepsilon), \quad (16)$$

де t, b – розміри зразка; $\varepsilon = l/b$ – відносна довжина тріщини; $\psi(\varepsilon)$ – поправочна функція, яка для даної схеми навантаження і типу зразка має вигляд:

$$\psi(\varepsilon) = \frac{2+\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)^3}} (0,886 + 4,64\varepsilon - 13,32\varepsilon^2 + 14,72\varepsilon^3 - 5,60\varepsilon^4) \quad ; \quad (17)$$

- приріст втомної тріщини на i -тому етапі між двома послідовними вимірюваннями

$$\Delta l_i = l_i - l_{i-1}; \quad (18)$$

- число циклів навантаження між двома послідовними вимірюваннями

$$\Delta N_i = N_i - N_{i-1}; \quad (19)$$

- швидкість росту тріщини

$$V = \frac{\Delta l_i}{\Delta N_i} \quad (20)$$

Отримана кінетична діаграма втомного руйнування для досліджуваного матеріалу в подвійних логарифмічних координатах представлена на рис. 6.

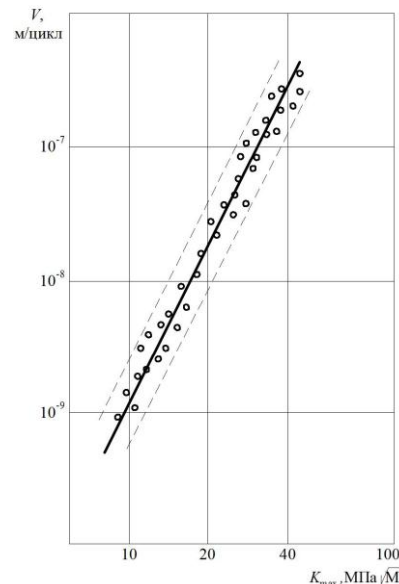


Рис. 6. Кінетична діаграма втомного руйнування: сталь 20; $R=0,1$; $C=1,097 \cdot 10^{-13} \text{ м}/(\text{МПа}\sqrt{\text{М}})^{4,04}$, $n=4,04$

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

Характеристики циклічної тріщиностійкості мають такі значення: пороговий коефіцієнт інтенсивності напружень $K_{th} = 7 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$; критичний $K_{fc} = 50 \text{ МПа}\sqrt{\text{М}}$; параметри, які описують середню ділянку діаграми співвідношен-

ням $V = CK_1^n$, $C = 1,1 \cdot 10^{-13} \text{ м}/(\text{МПа}\sqrt{\text{М}})^{4,04}$, $n = 4,04$. Результати випробувань приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати випробувань зразків на втому

№ зразка	P , кг	σ_{\max} , МПа	N , цикл	$\lg N$
1	765	300	$1,58 \cdot 10^4$	4,20
2	740	290	$2,85 \cdot 10^4$	4,45
3	700	275	$4,57 \cdot 10^4$	4,66
4	610	240	$7,24 \cdot 10^4$	4,86
5	520	205	$2,52 \cdot 10^5$	5,40
6	470	185	$1,45 \cdot 10^6$	6,16
7	345	135	$2,51 \cdot 10^6$	6,40
8	320	125	$4,36 \cdot 10^6$	6,64

Наукова новизна та практична значимість

Автором вперше проведені багатоваріантні експериментальні і теоретичні розрахунки міцності та втомної тріщиностійкості трубної сталі тривало експлуатованих потенційно-небезпечних ділянок магістральних трубопроводів. Вперше реалізовано комплекс експериментальних досліджень з визначення механічних і втомних характеристик міцності і циклічної тріщиностійкості трубної сталі тривало експлуатованих газопроводів. Побудова діаграми втомного руйнування яка необхідна для оцінки міцності, втомної тріщиностійкості і довговічності.

Висновки

1. Зроблено огляд і аналіз сучасних методів розрахунку магістральних трубопроводів на міцність і довговічність і на цій основі запропонована методика комплексної оцінки работоздатності досліджуваного етиленопроводу як з традиційних позицій класичних критеріїв міцності, так і підходів механіки втомного руйнування, які дозволяють враховувати циклічний характер зміни навантажень в трубопроводі, а також наявність в ньому конструктивних кон-

центраторів напружень, дефектів матеріалу і втомних пошкоджень труб.

2. Реалізовано комплекс експериментальних досліджень по визначенню механічних і втомних характеристик, циклічної тріщиностійкості трубної сталі та побудована діаграма втомного руйнування для сталі 20, необхідних для проведення розрахунків етиленопроводу на міцність і довговічність.

3. Надійність роботи підземних газопровідних систем в значній мірі залежить від рівномірного прилягання трубопроводу до ґрунтової основи. Аналіз відмов у роботі трубопроводів свідчить, що аварійний стан виникає в більшості випадків на тих ділянках де не виконуються необхідні вимоги. Наявність пустот під трубою призводить до перерозподілу діючих на неї зусиль, втрати стійкості і руйнування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Айнбіндер, А. Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость [Текст] / А. Б. Айнбіндер, А. Г. Камерштейн // Справочное пособие. – Москва : Недра, 1982. – 343 с.
2. Бородавкин, П. П. Прочность магистральных трубопроводов [Текст] / П. П. Бородавкин, А. М. Синюков. – Москва : Недра, 1984. – 245 с.

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

3. Бородавкин П. П. Трубопроводы в сложных условиях [Текст] / П. П. Бородавкин, В. Д. Таран. – Москва : Недра, 1968. – 304 с.
4. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение [Текст]. – Введ. 1986-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 24 с.
5. ГОСТ 25859-83. Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках [Текст]. – Введ. 1984-01-07. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 24 с.
6. ГОСТ 25-502-79. Методы механических испытаний на усталость [Текст]. – Введ. 1981-01-07. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 21 с.
7. Дарчук, О. І. Розрахункова схема трубопроводу підсиленого бандажем [Текст] / О. І. Дарчук, Й. Й. Лучко, В. А. Зозуляк // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів і конструкцій. ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів : Каменяр, 1998.– Вип. 3.– с. 584–593.
8. Егерман, Г.Ф. Ремонт магистральных газопроводов [Текст] / Г. Ф. Егерман, М.Д. Джафаров, Е. А. Никитенко. – Москва : Недра, 1973. – 288 с.
9. Обстеження і розробка методичних рекомендацій по експлуатації етиленпроводу Калуш – границя Угорщини [Текст] : звіт НДР (заключий), госпдоговір № 1947 від 01.04.1990 р. // ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України Львів : 1992. – 65 с.
10. Маруха В. І. Механіка руйнування та міцність матеріалів / В. І. Маруха, В. В. Панасюк, В.П. Силованюк //.– Львів, 2009. – Т. 12.– 261 с.
11. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. РД 50-345-82 [Текст]. – Москва : Изд-во стандартов. – 1983.
12. Механика разрушения и прочность материалов: Справ, пособие. В 4 т. [Текст] / Под общей ред. Панасюка В. В. // – Киев : Наук, думка, – 1988.
13. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок [Текст]. – Москва : Металлургия, 1973. – 408 с.
14. Правила капитального ремонта линейной части магистральных газопроводов (ВСН2-182-79) [Текст]. – Москва : Мингазпром, 1979.
15. Правила капитального ремонта линейной части магистральных трубопроводов /ВСН2-112-79/ [Текст]. – Москва : Мингазпром, 1979.
16. Методика определения характеристик трещиностойкости тонкостенных сосудов и нефтепроводов. Руководящий документ [Текст]. – Уфа : ВНИИСПТнефть, 1968. – 54 с.
17. Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. [Текст] / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев : Наук, думка, 1967. – 1304 с.
18. Фалькевич, А. С. Прочность и ремонт сварных резервуаров и трубопроводов [Текст] / А. С.Фалькевич, М. Л. Анучкин. – Москва : Гостоптехиздат, 1956. – 149 с.
19. Этиленопровод госграница ВНР-СССР – Калушский химико-металлургический комбинат. Технический проект. Т. 2, кн. 3. Линейные работы и сооружения [Текст]. – Киев : Книги про трубопровод, 1972. – 254 с.
20. Folias E. S. On the theory of fracture of curved sheets. – End. Fract. Mech. – 1970. – №2 – pp. 151–164.

И. И. ЛУЧКО*

* Кафедра «Мосты и тоннели», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепр, Украина, 49010, тел. +38 (097) 033 18 36, эл. почта lychko.diit@mail.ru

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ГАЗОПРОВОДА НА ПРОЧНОСТЬ, УСТАЛОСТНУЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ

Цель. Целью работы является анализ методов расчета и выполнить оценку прочности и усталостной трещиностойкости газопровода длительной эксплуатации. **Методика.** На основе анализа современных методов расчета магистральных трубопроводов на прочность и долговечность и на этой основе сформулирована методика комплексной оценки работоспособности исследуемого этиленпровода, как с позиций классических критериев прочности, так и подходов механики усталостного разрушения, которые позволяют учесть циклический характер изменения нагрузок в трубопроводе. **Результаты.** Полученные результаты расчетов прочности и усталостной трещиностойкости газопровода длительной эксплуатации по классическим критериям прочности и оценки работоспособности трубопроводов с учетом их дефектности на основе механики

© Й. Й. Лучко, 2018

МОСТИ ТА ТУНЕЛІ: ТЕОРІЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРАКТИКА

разрушения. Полученные экспериментальные данные прочности и трещиностойкости трубной стали и ее сварных соединений газопровода. На основе комплекса экспериментов построена диаграмма усталостного разрушения газопровода. **Научная новизна.** Автором впервые проведены многовариантные экспериментальные и теоретические расчеты прочности и усталостной трещиностойкости трубной стали продолжалось эксплуатируемых потенциально опасных участков магистральных трубопроводов. **Практическое значение.** Полученные результаты прочности и усталостной трещиностойкости позволили усовершенствовать методические основы экспресс метода оценки работоспособности потенциально опасных участков магистральных трубопроводов.

Ключевые слова: магистральный трубопровод; твердость металла; оценка работоспособности; трубная сталь; расчетная и допускаемые напряжения; коэффициент запаса прочности

J. LUCHKO*

* Department «Bridges and Tunnels» of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan Str., 2, Dnepr, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 033 18 36, e-mail lychko.dii@mail.ru

METHODS OF CALCULATION AND RESEARCH OF GAS PIPELINE MATERIALS FOR STRENGTH, FATIGUE CRACK RESISTANCE

Purpose. The aim of the paper is to analyze the calculation methods and to assess the strength and fatigue crack resistance of a long-term gas pipeline **Methodology.** On the basis of the analysis of modern methods for calculating the main pipelines for strength and durability, and on this basis, a methodology for the integrated evaluation of the operability of the ethylene conductor was formulated, both from the standpoint of the classical strength criteria and fatigue fracture mechanics approaches that allow for the cyclic nature of load changes in the pipeline. **Findings.** The results of calculating the strength and fatigue crack resistance of a long-term gas pipeline according to the classical strength criteria and evaluation of the efficiency of pipelines, taking into account their defectiveness on the basis of fracture mechanics. The obtained experimental data on the strength and crack resistance of pipe steel and its welded gas pipeline joints. Based on the complex of experiments, a diagram of the fatigue fracture of the gas pipeline was constructed. **Originality.** The author for the first time carried out multivariate experimental and theoretical calculations of the strength and fatigue crack resistance of pipe steel of continually operated potentially dangerous sections of main pipelines. **Practical value.** The obtained results of strength and fatigue crack resistance made it possible to improve the methodological basis of the rapid method for assessing the operability of potentially hazardous sections of main pipelines.

Keywords: pipeline; reservoir; strength; pipe steel; rated and permissible stresses; safety factor

REFERENCES

1. Aynbinder A. B., Kamershtejn A. G. Raschet magistralnykh truboprovodov na prochnost i ustoychivost [Calculation of trunk pipelines for strength and stability]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 343 p.
2. Borodavkin P. P., Sinjukov A. M. Prochnost magistralnykh truboprovodov [Strength of main pipelines]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 245 p.
3. Borodavkin P. P., Taran V. D. *Truboprovody v slozhnykh usloviyakh.* [Pipelines in difficult conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 304 p.
4. *GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie.* [State Standard 1497–84. Metals. Methods of tensile testing]. Moscow, Standartinform Publ., 1985.
5. *GOST 25859-83. Sosudy i apparaty stalnye. Normy i metody rascheta na prochnost pri malotsiklovyykh nagruzkakh* [State Standard 25859-83. Vessels and apparatuses are steel. Norms and methods for calculating strength for low-cycle loads]. Moscow, Standartinform Publ., 1984.
6. *GOST 25-502-79. Metody mekhanicheskikh ispytaniy na ustalost.* [State Standard 25-79. Methods of mechanical fatigue tests]. Moscow, Standartinform Publ., 1982.
7. Darchuk O. I., Luchko J. J., Zozuljak V. A. Rozrakhunkova skhema truboprovodu pidsylenogho bandazhem. [Design scheme of the pipeline reinforced bandage] *Mekhanika i fizyka rujnuvannja budivelnykh materialiv i konstrukcij. FMI Karpenka NAN Ukraine.* Lviv, 1998. issue. 3. pp. 584–593.
8. Yegerman G. F., Dzhafarov M.D., Nikitenko Ye. A. *Remont magistralnykh gazoprovodov* [Repair of gas mains]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 288 p.

9. *Zvit na temu: Obstezhennja i rozrobka metodychnykh rekomendacij po ekspluataciji etylenprovodu Kalush-ghranycja Ughorshhyny* [Inspection and development of guidelines for the operation of the Kalush-Hungarian pipeline]. Lviv, 1992, 65 p.
10. Marukha V. I. *Mekhanika rujnuvannja ta micnistj materialiv* [Mechanics of fracture and strength of materials]. Lviv, 2009, vol. 12. 261 p.
11. *Metodicheskie ukazaniya. Raschety i ispytaniya na prochnost. Metody mekhanicheskikh ispytaniy metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoykosti (vyazkosti razrusheniya) pri tsiklicheskom nagruzenii. RD 50-345-82* [Methodical instructions. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Determination of fracture toughness characteristics (fracture toughness) under cyclic loading. RD 50-345-82]. Moscow, Standartinform Publ., 1983.
12. Panasyuk V. V *Mekhanika razrusheniya i prochnost materialov* [Mechanics of failure and strength of materials]. Kyjiv, Naukova dumka Publ., 1988.
13. *Normy rascheta na prochnost elementov reaktorov, parogeneratorov, sosudov i truboprovodov atomnykh elektrostantsiy, opytnykh i issledovatel'skikh yadernykh reaktorov i ustanovok* [Norms for calculating the strength of elements of reactors, steam generators, vessels and pipelines of nuclear power plants, experimental and research nuclear reactors and installations]. Moscow, Metalurgiya Publ., 1973. 408 p.
14. *VSN2-182-79 Pravila kapitalnogo remonta lineynoy chasti magistralnykh gazoprovodov* [VSN2-182-79 Rules of overhaul of the linear part of the main gas pipelines]. Moscow, Mingazprom Publ., 1979.
15. *VSN2-112-79 Pravila kapitalnogo remonta lineynoy chasti magistralnykh truboprovodov* [VSN2-112-79 Rules for overhauling the linear part of the main pipelines]. Moscow, Mingazprom Publ., 1979.
16. *Rukovodyashchij dokument. Metodika opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti tonkostennykh sosudov i nefteprovodov* [Guidance document. Technique for characterizing the fracture toughness of thin-walled vessels and oil pipelines]. Ufa, 1968. 54 p.
17. Troshchenko V. T., Sosnovskiy L. A. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov* [Resistance to fatigue of metals and alloys.]. Kyjiv, Nauk dumka Publ., 1967. 1304 p.
18. Falkevich A. S., Anuchkin M. L. *Prochnost i remont svarnykh rezervuarov i truboprovodov*. [Strength and repair of welded tanks and pipelines]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1956. 149 p.
19. *Etilenoprovod gosgranitsa VNR-SSSR – Kalushskiy khimiko-metallurgicheskij kombinat. Tekhnicheskij projekt. T. 2, kn. 3. Lineynye raboty i sooruzheniya*. [Ethylene pipeline state border of Hungary-USSR - Kalush Chemical-Metallurgical Combine. Technical project]. Kyjiv, Books about the pipeline Publ., 1972. 254 p.
20. Folias E. S. On the theory of fracture of curved sheets. *End. Fract. Mech.* 1970. №2. pp. 151–164.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н, доц.О. Л. Тютькін, д.т.н., проф. Г. І. Гайко

Надійшла до редколегії 26.09.2018.

Прийнята до друку 22.10.2018.