

ВПЛИВ НЕРІВНОМІРНОСТІ СПОЖИВАННЯ ГАЗУ НА КОРОЗИЙНО-ВТОМНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ

О. С. Тараєвський, С. Й. Тараєвський

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано - Франківськ, вул. Карпатська, 15,
тел. (03422) 4-24-64, e-mail: rector@nung.edu.ua

Представлено результати експериментальних досліджень і проаналізовано вплив тривалого терміну експлуатації магістральних газопроводів, а також природні концентратори напружень на фізико-механічні властивості зварних з'єднань сталі 17ГІС. Розроблено методику та встановлено закономірності руйнування матеріалу зварних з'єднань газопроводів та концентратори напруги при статичному та низькочастотному навантаженні під час довготривалої експлуатації. Розглянуто деякі аспекти механізму руйнування зварних з'єднань трубопроводів, що перебувають в довготривалій експлуатації, а також концентрацій напруг.

Ключові слова: втома, наводнення, концентратор напружень, зварне з'єднання, зварний шов, газопровід, статичне навантаження, низькочастотне навантаження.

Представлены результаты экспериментальных исследований и проанализировано влияние длительного срока эксплуатации магистральных газопроводов, а также влияние природных концентраторов напряжений на физико-механические свойства сварных соединений стали 17ГІС. Разработана методика и установлены закономерности разрушения материала сварных соединений газопроводов и концентраторов напряжений при статическом и низкочастотном нагрузке при длительной эксплуатации. Рассмотрены некоторые аспекты механизма разрушения сварных соединений трубопроводов, которые находятся в долговременной эксплуатации, а также концентраций напряжений.

Ключевые слова: усталость, наводораживание, концентратор напряжений, сварной шов, газопровод, статическая нагрузка, низкочастотные нагрузки.

The results of experimental studies and analyzed the impact of long-term operation of gas pipelines, as well as natural stress concentrators on the physico-mechanical properties of welded joints of steel 17GІS. The technique and the regularities of the destruction of the material of welded joints of gas pipelines under static and low frequency loading for long term use, as well as stress concentrators. Some aspects of the mechanism of fracture of welded zednantruboprovodiv who are in long-term operation, as well as stress concentrations.

Key words: fatigue, floods, stress concentrators, weld of unity, weld, gas, static load, low-frequency loads.

Розрахунок на міцність магістральних трубопроводів проводиться за методом граничного стану, що визначається міцністю труб на розрив від дії статичних навантажень. При цьому не враховувалися неоднорідності розподілу напружень в стінці труби за рахунок дефектів, а також викликані відхиленнями перерізів труб від правильної геометричної форми за рахунок наявності зварного шва, зміщення кромки в ньому і овальності розтину в цілому.

Можна було очікувати, що для виконання умови статичної міцності труб великого діаметра повинна забезпечуватись робота трубопроводів без руйнувань. Однак практика експлуатації показує, що в багатьох випадках труби виходять з ладу в міру напруцювання циклів. Ці експлуатаційні розриви по своєму зовнішньому вигляду схожі на руйнування під дією внутрішнього тиску при статичному навантаженні до розриву. При цьому тріщини, як і при статичному розриві, утворюються в поздовжньому напрямку і, як правило, в зоні зварного з'єднання. Однак аналіз показує, що характер руйнування в цих випадках неоднаковий. Основною

особливістю експлуатаційних розривів є відсутність пластичних деформацій у зоні осередку руйнування і наявність їх лише у зонах дефекту.

Статистичний аналіз механічних характеристик трубної сталі 17Г1С у вихідному стані проведено за результатами випробувань, наведеними у сертифікатах. Причиною подібних руйнувань є накопичення необоротних мікропластичних пошкоджень і розвиток вихідних мікрodefektів, що призводять до появи і поширення втомних тріщин від повторних впливів внутрішнього тиску в окрихченому металі труби в процесі експлуатації трубопроводів.

Фізична характеристика в'язкості металів K_θ , впливає з умови реалізації тріщини

$$K_\theta = \frac{R_{mc}}{\sigma_m}, \quad (1)$$

де R_{mc} – коефіцієнт опору тріщини.

Коефіцієнтом в'язкості параметр K_θ названий був не випадково, тому що відношення R_{mc}/σ_m чисельно показує, якою мірою потрібно збільшити напругу текучості для того, щоб напруга σ_T досягла рівня R_{mc} і створилися можливості для реалізації тріщини. Чим більше K_θ , тим більші потенційні можливості металу опиратись виникненню тріщини. У цьому полягає фізичний зміст і фундаментальний характер K_θ як механічної характеристики сталей.

Умова крихкого тріщини при одноосьовому розтягу: $\sigma_m = R_{mc}$, тобто $K_\theta = 1$.

У неоднорідних силових полях, зокрема в місця знаходження концентраторів напруг, у результаті розвитку локальної деформації найбільша жорсткість j_{max} створюється на границі пружно-пластичної зони [2], де умова тріщини на границі текучості має вигляд $j_{max} \cdot \sigma_m = R_{mc}$ або $K_{\theta e} = j_{max}$. У пластично ж деформованій зоні може раніше реалізуватися в'язкий мікророзрив: $j_{max} \cdot \sigma_m = R_{mc}$ тобто $K_{\theta e} = j_{max}$ оскільки $K_{\theta e} < K_\theta$. Таким чином, мікрокрихке руйнування може породжуватися двома мікромеханізмами зародження тріщини: крихким (на границі текучості) і в'язким (на стадії розвитку деформації). Ми звернемося лише до деформаційного критерія Крафта, відповідно до якого умова руйнування тріщини під навантаженням реалізується тоді, коли на деякій відстані d_T від вершини тріщини досягається критична деформація e_{kp}

$$e_{kp} = \frac{K_1}{E\sqrt{2\pi d_m}} \quad (2)$$

Провівши детальний аналіз довго експлуатованих сталей можна ствердно говорити, що критична деформація чисельно дорівнює показнику n , у силу чого з (2) одержуємо вираз:

$$K_1 = nE\sqrt{2\pi d_m}. \quad (3)$$

Слід зазначити, що використане Крафтом наближення $e_{kp} \approx n$ у дійсності реалізується для маловуглецевих сталей (куди відносяться трубні сталі) у вигляді $e_{min} \approx n$. Таким чином, критична деформація по Крафту має сенс деформації в мінімуму $K_{\theta e}$, а отже, ця модель справедлива для сталей, що мають немонотонну залежність $K_{\theta e}$ від деформації, у яких $n > 0,25$. Очевидно, модель Крафта описує умови руйнування від тріщини, коли критична ситуація створюється перетинанням лінії жорсткості j із кривої K_1 на ранніх стадіях пластичної деформації. У цьому випадку деформація e_{kp} невелика й, отже, критична ситуація виникає недалеко від границі пружнопластичної зони, що дозволяє вважати критичну відстань d_T наближено рівною ефективному радіусу вершини тріщини $d_T \approx \rho_e$, з (3) одержуємо

$$K_1 = nE\sqrt{2\pi\rho_e}. \quad (4)$$

Дослідження зміни коефіцієнта інтенсивності напруг (K_I) у трубних сталях вироблялося на спеціально виготовлених зразках. На бічній стороні цих зразків робляться надрізи глибиною до 1/4 ширини зразка (ширина зразка $b = 50$ мм). Робоча поверхня зразків шліфується й полірується. Потім зразки піддаються циклічному навантаженню за допомогою спеціально сконструйованого пристрою з метою виростити в них втомні тріщини. Після цього зразки піддаються статичному розтягання до

руйнування й при цьому виробляються виміри величини розкриття (δ_0) і сили навантаження з метою визначення K_I .

Для оцінки опору руйнуванню пластичних металів, таких як трубні сталі, застосовується параметр – критичне розкриття тріщини. Критичні значення коефіцієнтів інтенсивності напруг були визначені для сталей 14ХГС й 17Г1С.

Відсутність значень K_I у вихідному стані труби не дозволяє зробити які-небудь висновки про ступінь старіння. Однак, відзначимо, що сталі подібного класу у вихідному стані мають значення $K_I = (130...180) \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Таким чином, характеристики опору крихкому руйнуванню нафтопровідних експлуатованих сталей залежать від терміну служби, напрямку вирізки зразків і місця розташування концентраторів, структурного стану й властивостей сталі.

Узагальнюючи отримані дані, слід зазначити, що процеси, що відбуваються в трубних сталях від час їхньої експлуатації мікропластичні деформації й руйнування залежать від ступеня деформаційного старіння, окрихлості металу. На певному етапі навантаження (наприклад, для сталі 17ГС - 4000-5000 циклів) відбувається розширення смуг ковзання й розбивка їх на окремі ділянки. Це порозумівається появою на відносно пізній стадії розвитку смуг ковзання поперечних ліній ковзання й скупченням на них атомів вуглецю, азоту, утворенням у цих областях мілкодисперсних карбідів і нітридів. Це процеси, безсумнівно, також приводять до окрихчення локальних областей трубних сталей.

Залишкові напруги в трубних сталях викликають хаотично пружні руйнування кристалічних решіток у результаті стиску або розтягання кристала на величину, приблизно рівну розміру зерна. Ці напруги виникають у межах зерна й мають дислокаційне походження, тобто являють собою результат суперпозиції далекодіючих полів дислокацій, певним чином розподілених усередині зерна. Середнє значення таких мікронапруг не може перевищувати межі текучості металу й звичайно для металів у зміцненому (окрихченому) стані наближається за рівнем до межі пружності.

Як було відзначено, значення ψ і R_{mc} зі збільшенням строку експлуатації зменшуються, значення S_K збільшуються [2]. Ці експериментальні відомості показують також, що в процесі експлуатації нафтопроводів відбувається окрихчення металу труб за рахунок необоротних мікропластичних деформацій і деформаційного старіння.

Значення мікротвердості й залишкової напруги були визначені практично на всіх досліджених сталях. Отримані дані показують, що із спливанням терміну служби ці значення змінюються своєрідно. Це порозумівається, імовірно, тим, що параметри H_μ і мікроспотворення $\Delta d/d$ є інтегральними величинами. Незважаючи на це, з отриманих результатів видно, що із часом значення цих величин зростає, що вказує на окрихчення сталей. Досить цікавим є факт більш інтенсивного зростання значення $\Delta d/d$ поблизу дефекту в довгостроково експлуатованих труб.

Загальноприйнята модель механізму утомного росту тріщин полягає в тому, що вершина тріщини те відкривається, то закривається внаслідок зворотного пластичної течії в кожному циклі. Оборотно розкриття у вершині тріщини при плоскій деформації виводиться з використанням рівняння

$$\sigma_y = \tau_i + K_y^s d^{-1/2}, \quad (5)$$

де σ_y – межа текучості при зсуві; τ_i – напруга течії; K_y – коефіцієнт, що не залежить від температури, якщо сталь не схильна до старіння; d – розмір зерна.

В якості величини приросту тріщини за цикл приймається формула

$$\Delta \delta \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta K^2}{2(2\sigma_c)E}, \quad (6)$$

де σ_c – напруга течії для циклічно зміцненого металу.

Цей приріст тріщини пропорційний тієї частини збільшення тріщини, що не відновлюється. У цьому випадку передбачене значення d/dN було б пропорційно ΔK^2 . Однак поширення тріщини в кожній точці контуру може бути неоднаковим. Це особливо відноситься до зістарених сталей. Звичайно, у деяких областях орієнтація зерен виявляється сприятливою для ковзання, однак, у зістарених трубних сталях основну роль відіграють локально-окрихчені області, пов'язані з розпадом цементиту й, імовірно, утворенням дрібнодисперсних часток карбідів і нітридів.

Відносно чутливими параметрами до окрихченості маловуглецевих сталей є критичне напруження руйнування S_k , коефіцієнт інтенсивності напруг K_I , і коефіцієнт опору тріщини R_{mc} . Критичне напруження руйнування трубних сталей зі збільшенням терміну служби трубопроводів збільшується. Збільшення значення S_k тим більше проявляється, чим більша кількість вуглецю в сталях (наприклад, у сталях 17Г1С й 19Г).

Параметр K_I , є в якомусь ступені критичною характеристикою металу. Подібно тому, як σ_b , σ_m , S_k , з одного боку, і δ , ψ – з іншого боку, оцінюють міцність й пластичність гладкого зразка при розтяганні, так K_I призначений оцінювати міцність металу особливих точок зразка із тріщиною. У зістарених металах зниження значення K_I показує на наявні ділянки, де ослаблені атомні зв'язки.

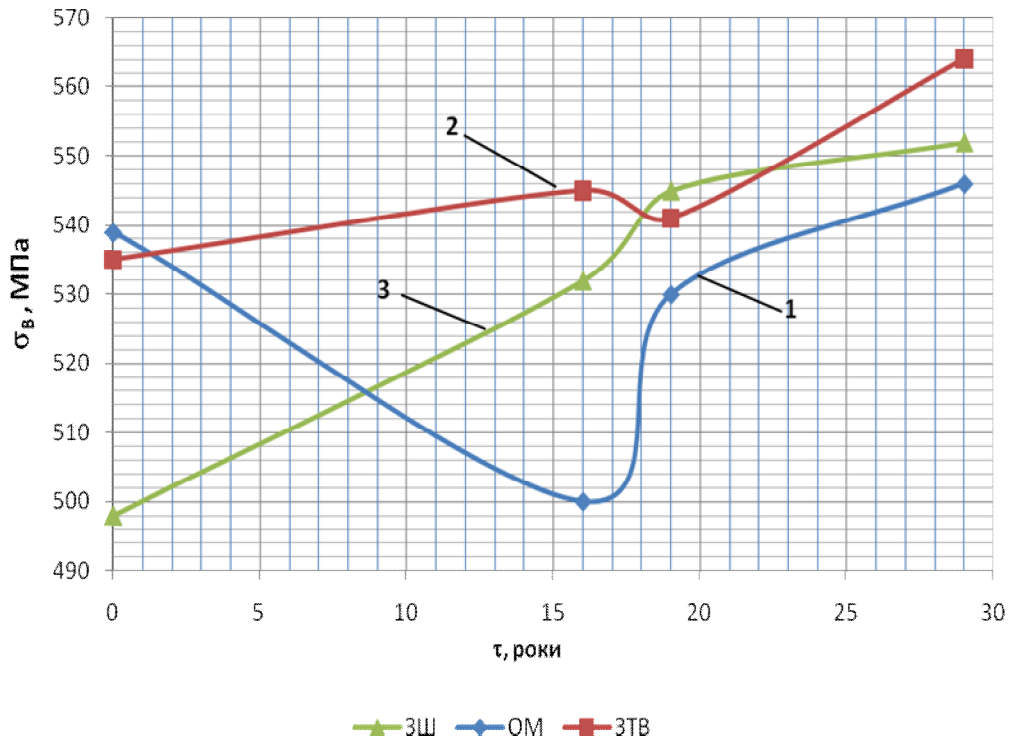
Зменшення значення R_{mc} з часом експлуатації вказує на структурні зміни (виникнення смуг ковзання, генерація нових дислокацій і т.п.) і зміни хімічного складу в локальних областях (перерозподіл домішкових атомів, утворення нових часток карбідів і нітридів і розпад цементиту) в окремих перлітних зернах.

Експериментальні дані можна пояснити виділенням атомів вуглецю із твердого розчину, закріпленням дислокацій, а отже, зміцненням феритної матриці. Отримані дані показують, що досліджувані нами трубні сталі до 30-ти років експлуатації стають практично мало схильними до деформаційного старіння.

У результаті зміни внутрішнього тиску на стінках труби виникають напруги, які концентруються в зонах зазначених дефектів, тобто в локальних областях, досягають межі текучості металу і навіть перевищують його. При дії повторно-статичних навантажень протікають незворотні процеси динамічного деформаційного старіння і поступового накопичення ушкоджень (мікропластичні деформації), які призводять до утворення мікротріщин, зниження опірності металу руйнування. Необхідно зазначити, що різке зниження значень границі міцності для ОМ (рис.1 крива 1) вказує на те, що найбільш небезпечним періодом експлуатації для магістральних труб із сталі 17Г1С є перших 16 років експлуатації. В подальших періодах експлуатації вирівнюються значення границі витривалості. Це свідчить про те, що під час тривалої експлуатації зварне з'єднання стає одним цілим із металом труби.

При тривалому впливі експлуатаційних навантажень і навколишніх середовищ у металі труб магістральних нафтопроводів відбувається поступове накопичення незворотних пошкоджень (наприклад, локальне або рівномірний зменшення товщини стінки).

Відомо, що надійність роботи магістральних нафтопроводів визначається не тільки запасом міцності металу труб, але і опірністю його крихкому руйнуванню. Проведений аналіз умов експлуатації та характеру руйнувань труб показує наявність випадків виходу з ладу трубопроводів в результаті зменшення опору металу малоциклового руйнуванню. На це, перш за все, вказує характер руйнування кромки труб. У більшості випадків кромки в осередку руйнування мають зернисту (кристалічну) будову, кут між площиною кромки і поверхнею труби становить близько 90°.



1- основний метал; 2- зона термічного впливу; 3- зварний шов

Рисунок 1 – Залежність границі міцності різних зон зварного з'єднання від періоду експлуатації магістрального трубопроводу

Зниження довговічності труб в результаті розвитку тріщин, зносу і старіння в значній мірі залежить від терміну, режиму та природно-кліматичних умов експлуатації трубопроводів, від системи технічного обслуговування і ремонту, а також від марки сталі і технології виготовлення металу труб. Терміни експлуатації труб окремих магістральних трубопроводів становлять 40 років і більше.

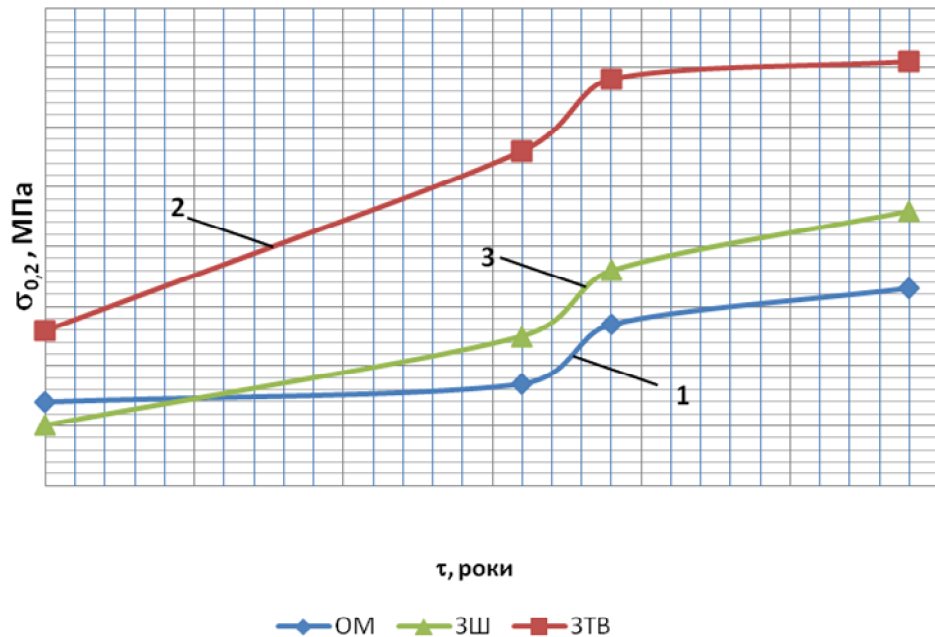
Вплив терміну експлуатації трубопроводів на їх технічний стан може бути охарактеризоване параметром потоку відмов трубопроводів залежно від тривалості їх експлуатації. Зі збільшенням терміну служби трубопроводів інтенсивність відмов зростає, що свідчить про зниження їх несучої здатності. Однак оцінка впливу терміну служби на технічний стан трубопроводів не може ґрунтуватися тільки на інтенсивності відмов. Ця залежність більш складна, залежить від багатьох чинників і вимагає спеціального дослідження.

Як видно із рисунка 2, 3 характер кривих практично нічим не відрізняється, це свідчить про те, що зміна границі текучості та абсолютно видовження в експлуатованій трубі проходить однаково у всіх зонах зварного з'єднання.

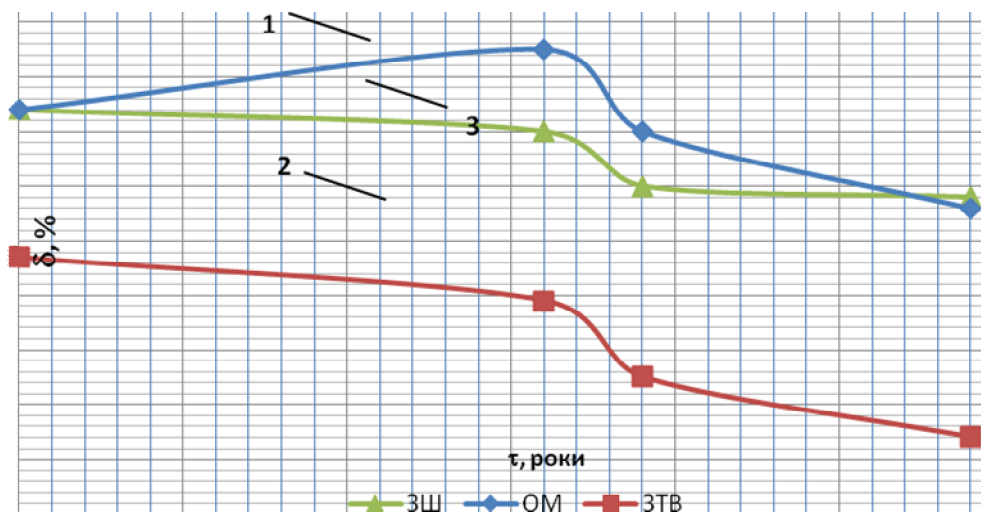
Результати досліджень показують, що для встановлення справжньої картини аварійності на трубопроводах необхідне детальне вивчення не тільки зовнішніх факторів, що діють на нього, але й структурних змін у металі труб, які відбуваються в трубних сталях в процесі їх експлуатації.

Вплив режиму експлуатації трубопроводів на їх технічний стан і на фізичний стан металу труб проявляється через зміну робочого тиску в процесі експлуатації і характеризується числом циклів зміни робочого тиску. Метал труб магістральних трубопроводів відчуває не тільки статичне, а й циклічне (повторно-статичне) навантаження в результаті коливань внутрішнього тиску, а більшість руйнувань металу труб носить крихкий характер. Отже, закладений нормативними документами дворазовий запас міцності, розрахований на статичне навантаження, не забезпечує циклічну довговічність металу труб, яка безперервно зменшується з часом експлуатації трубопроводів. Це обумовлено тим, що при малоциклового навантаженні, на відміну від статичного, через наявність концентраторів напружень відбувається накопичення необоротних мікропластичних деформацій у структурно-неоднорідних областях металу, перерозподіл атомів вуглецю та інших домішкових атомів, пов'язаних з наводненням і деформаційним старінням, які

призводять до окрихчування локальних ділянок металу, а отже, до зниження опірності трубних сталей крихкому руйнуванню.



1- основний метал; 2- зона термічного впливу; 3- зварний шов
Рисунок 2 – Залежність границі плинності різних зон зварного з'єднання від періоду експлуатації магістрального трубопроводу

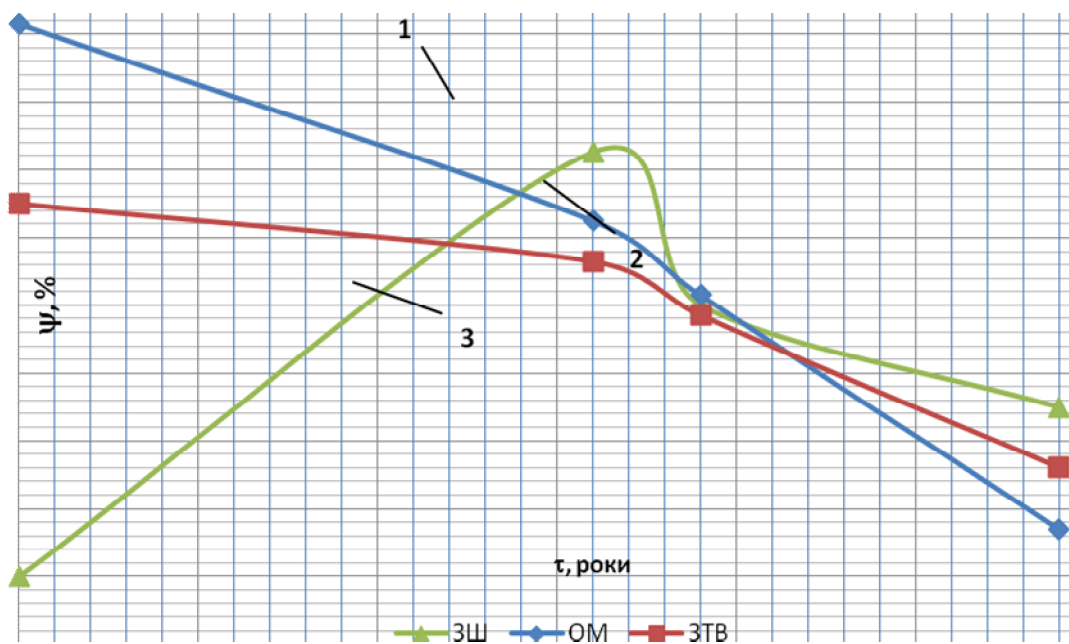


1- основний метал; 2- зона термічного впливу; 3- зварний шов
Рисунок 3 – Залежність абсолютного видовження різних зон зварного з'єднання від періоду експлуатації магістрального трубопроводу

У попередніх роботах виконано прогноз аварійності магістральних трубопроводів. На основі аналізу режиму роботи та аварійності трубопроводів зроблено висновок, що при збільшенні часу експлуатації до 20 років очікується зростання числа аварій через малоциклове руйнування труб у зварному кільцевому з'єднанні, навіть не маючи внутрішніх дефектів зварювання.

Під жорсткістю режиму експлуатації магістрального трубопроводу розуміється частота зміни внутрішнього тиску в період експлуатації. Жорсткість режиму експлуатації може характеризуватися відношенням числа циклів зміни внутрішнього тиску в аналізованому періоді до критичного числа циклів зміни внутрішнього тиску, при досягненні якого може настати руйнування трубопроводу.

Слід зазначити, що кількісно показники міцності вищі порівняно з даними випробувань гладких зразків, що відображає ефект концентрації напружень – утруднення пластичної деформації. Важко також визначати відносне видовження для таких зразків (рис. 4). Для ОМ отримано відчутне зниження характеристик пластичності при загальній закономірності зростання ефекту зі збільшенням терміну експлуатації та деяке підвищення характеристик міцності. Для ЗТВ однозначна залежність механічних властивостей зберігається тільки для показника ψ . Це саме стосується і для ЗШ – можна тільки відзначити різке зростання числового значення відносного звуження протягом перших 16 років експлуатації.



1- основний метал; 2- зона термічного впливу; 3- зварний шов

Рисунок 4 – Залежність відносного звуження різних зон зварного з'єднання від періоду експлуатації магістрального трубопроводу

Провівши аналіз зруйнованих зразків видно, що руйнування проходить по ЗШ. Це означає, що ЗШ є найбільш чутливим до крихкого руйнування в умовах наводнювання сталі 17Г1С, яка широко використовується для виготовлення магістральних газопроводів.

Як видно з наведених даних, більш чутливі зміни механічних властивостей у результаті експлуатації відбуваються в зоні термічного впливу та зварному шві, що пояснюється наявністю в них різних структурно-неоднорідних областей.

Висновки

Показано, що причиною зниження корозійної стійкості нафтопроводів, наприклад, є утворення приповерхневих мікротріщин, викликаних фазовими напругами, які є результатом локального розігріву приповерхневих обсягів металу до температур аустенізації під дією дробоструменевої обробки поверхонь труб.

Для запобігання значних деформацій і розігрівання при поверхневих обсягах вдосконалено технологію дробоструменевої обробки поверхні труб, що дозволило ефективно захистити їх від локальної корозії. Це свідчить про те, що транспортує середовище містить достатню для утворення сульфідів кількість сірководню, що слід враховувати при виборі марки сталі, призначеної для нанесення покриття.

Розглянуто перспективний напрямок зниження корозійної активності середовища, що транспортується, що складається у видаленні іонів кальцію з розчину за допомогою спеціальних хімічних реагентів. Виявлений механізм утворення продуктів корозійної пошкодженості нафтопроводів дозволив сформулювати вимоги до забезпечення корозійної стійкості труб, реалізація яких здійснюється шляхом їх економного модифікування корисними мікродобавками

Враховуючи особливості експлуатації газопроводів, у першу чергу, їх зварних з'єднань при катодному захисті та дії на них циклічних навантажень у корозійному середовищі, руйнування протікає із за водневої втоми. Крім того, якщо до катодно захищеної сталі постійно підводиться свіже корозійне середовище, яке інтенсивно переміщується, то процес наводнення протікає безперервно. Тому явище водневої втоми при катодному захисті газопроводів має місце. Найбільш чутливим до такого виду руйнування є кільцеві зварні з'єднання газопроводу. Зокрема виявлено, що при трохлому періоді експлуатації трубопроводу (більше 20 років) зварне кільцеве з'єднання може експлуатуватися тривалий період при правильному його навантаженні. Оскільки трубопроводи експлуатуються при низькочастотних коливаннях, які в свою чергу поділяються на низькі, високі та середні навантаження, руйнування відбувається неоднозначно.

Таким чином, важливою умовою забезпечення стійкості газопроводів проти корозійно – втомних руйнувань, в перекачуючому середовищі, є правильний і раціональний вибір величини допустимого напруження для даного робочого середовища та малій кількості циклів навантаження.

Література

1. Крижанівський Є.І. Вплив наводнення на корозійно - механічні властивості зварних швів газопроводів/ Є.І.Крижанівський, О.С.Тараєвський, Д.Ю.Петрина //Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. - №1(14). – С.25-29.
2. Карпенко Г.В. Прочность стали в коррозионной брезде / Г.В. Карпенко // М.:Машгиз, 1963.- 188с.
3. Похмурський В.І. Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій / В.І. Похмурський, Р.К.Мелехов. - К.: Наукова думка, 1990. - 347с.
4. Похмурський В.І. Коррозионная усталость металов / В.І.Похмурський. - М.: Металургия, 1985. - 207с.
5. Крижанівський Є.І. Вплив нерівномірності газоспоживання на напружений стан трубопроводу / Є.І.Крижанівський, О.С.Тараєвський //Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. - №3(12). – С.31-34.
6. Крижанівський Є.І. Чутливість до водневої крихкості зварного з'єднання сталі 17Г1С магістрального газопроводу/ О.Т.Цирульник, Є.І.Крижанівський, О.С. Тараєвський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2004. -№6. – С. 111-114.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
10.06.12*

*Рекомендована до друку оргкомітетом
міжнародної науково-технічної конференції
“Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу”,
яка відбулася 15-18 травня 2012 р.*