

Дослідження та методи аналізу

УДК 620.191.33

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РУЙНУВАННЯ ТРУБ ПІД ТИСКОМ ГАЗОПОДІБНОГО ВОДНЮ ТА ЧИСТОГО МЕТАНУ

І.М. Дмитрах, А.М. Сиротюк, О.Л. Лутицький, О.Л. Білий, Р.І. Вовк

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5, тел. (032) 2631400; e-mail: syrotiuk@ipm.lviv.ua

Розроблено методику та технічні засоби для дослідження процесів руйнування труб з модельними дефектами – концентраторами напружень під дією внутрішнього тиску водню та інших газоподібних середовищ. Створено спеціалізовану лабораторію з комп'ютерним управлінням процесу випробувань на розрив конструктивних елементів трубопровідних систем транспортування газоподібного водню та його сумішей, яка в автоматичному режимі забезпечує: подачу водню в порожнину випробовуваної труби при заданій швидкості зміни внутрішнього тиску $dp/dt = const$ та підтримання заданого тиску в трубі $p = const$ впродовж визначеного часу τ ; подальше навантаження труби внутрішнім тиском за деякої заданої швидкості $dp/dt = const$ до її розриву; безперервну реєстрацію внутрішнього тиску в трубі впродовж всього періоду випробувань та візуалізацію в реальному часі на моніторі комп'ютера функції $p = \Phi(\tau)$ для кожної стадії процесу випробування; реєстрацію моменту розриву труби і визначення руйнівного тиску $p = p^*$; виключення випробувальної системи після розриву труби і випуск відпрацьованої газової суміші з порожнини камери в атмосферу.

Проведені порівняльні випробування труб зі сталі X52 під тиском газоподібного водню і метану (модель природного газу) свідчать про зниження величини руйнівного тиску під дією водневого середовища. Здійснені фрактографічні дослідження поверхонь руйнування труб виявили різні домінуючі механізми руйнування: в'язкий „ямковий” механізм руйнування сталі за випробувань у метані і характерний рельєф квазісколу у присутності водню. Одержані результати вказують на можливість реалізації механізму водневого окрихчення малолегованих трубопровідних сталей в околі концентраторів напружень навіть за достатньо низьких тисків газоподібного водню в трубопроводі ($p = 2,0$ МПа) і температурі 20 °С.

Ключові слова: елементи трубопровідних систем; низьколеговані сталі; газоподібний водень; метан; концентратори напружень; поверхня руйнування; водневе окрихчення матеріалу; руйнівний тиск.

Разработана методика и технические средства для исследования процессов разрушения труб с модельными дефектами – концентраторами напряжений под действием внутреннего давления водорода и других газообразных сред. Создана специализированная лаборатория с компьютерным управлением процесса испытаний на разрыв конструктивных элементов трубопроводных систем транспортирования газообразного водорода и его смесей с другими газами, которая в автоматическом режиме обеспечивает: подачу водорода в полость испытываемой трубы при заданной скорости изменения внутреннего давления $dp/dt = const$ и поддержания заданного давления в трубе $p = const$ на протяжении определенного времени τ ; дальнейшее нагружение трубы внутренним давлением при некоторой заданной скорости $dp/dt = const$ до ее разрушения; непрерывную регистрацию внутреннего давления трубы на протяжении всего периода испытаний и визуализацию в реальном времени на мониторе компьютера функции $p = \Phi(\tau)$ для каждой стадии процесса испытаний до момента разрыва трубы и определения разрушающего давления $p = p^*$; выключение испытательной системы после разрыва трубы и выпуск отработанной газовой смеси из полости камеры в атмосферу.

Проведены сравнительные испытания труб из стали X52 под давлением газообразного водорода и метана (модель природного газа) показали снижение величины разрушающего давления при действии водородной среды. Проведенные фрактографические исследования поверхностей разрушения труб показали различные доминирующие механизмы разрушения: вязкий „ямочный” механизм разрушения сталей в метане и характерный рельеф квазисколы в присутствии водорода. Полученные результаты указывают на возможность реализации механизма водородного охрупчивания низколегированных трубопроводных сталей

в окрестности концентраторов напряжений даже при достаточно низких давлениях газообразного водорода в трубопроводе ($p = 2,0$ МПа) и температуре ($p = 2,0$ МПа).

Ключевые слова: элементы трубопроводных систем; низколегированные стали; газообразный водород; метан; концентраторы напряжений; поверхность разрушения; водородное охрупчивание материала; разрушающее давление.

The methods and technical means for fracture study of pipes with model defects (with the help of stress concentrators under the influence of the internal pressure of the hydrogen and other gaseous environments) have been developed. The special laboratory with computer control of burst testing process of the pipeline system structural components for transmission of gaseous hydrogen and its mixtures has been built. This system provides the following in automatic mode: hydrogen supply into the tested pipe under assigned rate of internal pressure change $dp/dt = \text{const}$ and maintenance of the assigned internal pipe pressure $p = \text{const}$ during definite time τ ; further internal pressure loading of the pipe at some assigned rate $dp/dt = \text{const}$ up to its burst; continuous recording of the pipe internal pressure during the whole period of testing and real time visualising of the function $p = \Phi(\tau)$ for each testing stage on the computer screen; recording of the pipe burst point and determining of the burst pressure $p = p_$; the testing system turning down after the pipe burst and outlet of the waste gaseous mixture from the chamber cavity into the atmosphere.*

The conducted comparative studies of the pipes made of the X52 steel under pressure of the gaseous hydrogen and methane (model of natural gas) have confirmed decreasing of the burst pressure under the influence of the hydrogen environment. The conducted fractography of the pipe fracture surfaces has revealed the following different dominant fracturing mechanisms: the tough "dimple" fracturing mechanism of the steel which is tested in methane and characteristic quasi-spalling relief in the presence of hydrogen. The obtained results show the possibility of realisation of hydrogen embrittlement mechanism for low-alloyed pipeline steels at the stress concentrators even under quite low gaseous hydrogen pressures in the pipeline ($p = 2,0$ МПа) and temperature of 20°C .

Keywords: pipeline system elements; low-alloyed steels; gaseous hydrogen; methane; stress concentrators; fracture surface; hydrogen embrittlement; burst pressure

Вступ. Українська газотранспортна мережа відіграє важливу роль як для національної економіки України, так і в глобальному значенні [1]. Ця важливість буде постійно зростати у зв'язку з перспективними планами впровадження європейської водневої енергетичної інфраструктури (див. наприклад [2, 3]), яка передбачає можливе використання існуючих трубопроводних мереж для транспортування сумішей природного газу та водню. Аспекти, що відносяться до технічної реалізації цих проєктів, а також їх економічне обґрунтування наведено та обговорюється у відповідній спеціалізованій літературі [4–11].

Тому проблеми, що відносяться до безпеки, надійності та цілісності газотранспортних мереж, які містять суміші природного газу та водню, є актуальними та важливими. Перш за все існує ймовірність, так званої, проблеми „водневого окрихчення” металу трубопроводів – впливу транспортованого водню на механічні властивості матеріалу [12, 13].

Окрім цього, специфічна довготривала експлуатація трубопроводів сприяє процесам наводнювання сталей. Умови зовнішнього середовища спричиняють процеси вільної корозії, де водень утворюється на поверхні металу як катодна складова відповідних електрохімічних реакцій. Цей факт був доведений декількома спеціальними дослідженнями (див. наприклад [7, 8, 14–17]). Також у експлуатаційних умовах при застосуванні катодного протикорозійного захисту можливе наводнювання трубопроводних сталей. Це спричиняє проблему конструкційної цілісності підземних трубопроводів, які експлуатуються тривалий період [18].

У зв'язку з цим, порівняльні дослідження руйнування труб під тиском газоподібного водню та чистого метану (модель природного газу) є актуальною науковою та науково-технічною задачею.

Аналіз сучасних досліджень і публікацій.

Актуальність і важливість досліджень взаємодії водню з конструкційними металами та сплавами пов'язана, в першу чергу, з використанням водню як перспективного енергоносія. Цей напрям досліджень є однією із пріоритетних тенденцій розвитку світової енергетики. Зокрема, він міститься в офіційних документах перспективного розвитку країн Європейського Союзу (див. наприклад [2, 3]). Для України цей напрям досліджень є також актуальним та важливим, і в цьому плані вже існують серйозні напрацювання в різних галузях науки і техніки.

Створення водневої енергетичної інфраструктури вимагає вирішення цілого ряду фундаментальних наукових проблем та науково-технічних завдань у галузі матеріалознавства, механіки матеріалів, інженерії поверхні металів та ін. Це, перш за все, розроблення та впровадження у практику дешевих технологій одержання водню у великих кількостях, розроблення нових класів матеріалів – ефективних акумуляторів водню, а також створення комплексу відповідного устаткування та металевих конструкцій (хімічні реактори, резервуари, трубопроводні системи, паливні комірки тощо), які можуть надійно функціонувати у воденьвмісних середовищах.

На сьогоднішній день загальновідомим є факт впливу водню на механічні властивості матеріалів. Однак відомо також, що залежно від умов взаємодії у системі „матеріал – воденьвмісне середовище” цей вплив може реалізуватись через цілий спектр різноманітних за фізико-хімічною природою явищ, які в кінцевому рахунку і призводять до втрати матеріалом своїх експлуатаційних характеристик. Тому наукова література визначає сучасний стан проблеми, як недостатньо вивчений, особливо у розумінні конкретних механізмів дії водню на процеси

Таблиця 1 – Хімічний склад сталей

| Марка сталі | Вміст елементів, % | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | C | Mn | Si | Cr | Ni | Cu | V | Mo | Ti | Nb | S | P | Al | Fe |
| K52 (Україна) | 0,20 | 1,65 | 0,60 | 0,80 | 0,30 | 0,30 | 0,10 | — | — | — | 0,035 | 0,033 | — | баланс |
| X52 (ЄС) | 0,22 | 1,22 | 0,24 | 0,16 | 0,14 | 0,19 | — | 0,06 | 0,04 | <0,05 | 0,036 | — | 0,032 | баланс |

руйнування залежно від специфіки системи „матеріал – середовище” (див. [19–23]).

У високорозвинутих європейських країнах, США та Канаді такі дослідження перебувають на стадії інтенсивного розвитку у контексті глобального завдання – створення інфраструктури водневої енергетики. Тому їх реалізація відбувається через, так звані, інтеграційні проекти, які охоплюють широкий спектр наукових, технічних та соціо-економічних проблем [3].

У цьому плані трубопроводи, що використовуються для транспортування воденьвмісних середовищ, розглядаються як об’єкти підвищеної відповідальності і важливості в рамках індустріальної та соціальної інфраструктури. З технічної точки зору вони є складними тривимірними конструкціями, які складаються з прямолінійних ділянок, патрубків, згинів, різнорідних зварних з’єднань тощо. Крім того, умови їх експлуатації є досить жорсткими і складними, оскільки вони підлягають впливу ряду чинників, таких як внутрішній тиск та циклічні навантаження (вібрації), дія яких підсилюється внутрішнім та зовнішнім середовищами. Потенційний синергізм впливу цих чинників підвищує ризик виникнення непрогнозованих пошкоджень та руйнувань впродовж їх тривалої експлуатації, що може спричинити аварійні ситуації з непередбачуваними техніко-економічними та соціальними наслідками [1, 12, 13].

Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи було здійснення порівняльних натурних досліджень руйнування труб з модельними дефектами – концентраторами напружень під дією внутрішнього тиску газоподібного водню та чистого метану (модель природного газу).

Досягнення поставленої мети вимагало вирішення наступних *задач*:

розробити методику та технічні засоби для проведення досліджень;

провести випробування та здійснити аналіз одержаних результатів для встановлення механізму руйнування труб у заданих умовах.

Об’єкт дослідження: процеси руйнування низьколегованих трубопровідних сталей з модельними дефектами – концентраторами напружень, що експлуатуються в умовах сумісної дії механічних навантажень та газоподібного водню і його сумішей з природним газом.

Предмет дослідження: величина руйнівного тиску газу для різних систем „матеріал–середовище”.

Методи дослідження – поєднання експериментальних методів механічних випробувань матеріалів, механіки руйнування та матеріалознавства.

Виклад основного матеріалу

Матеріали та послідовність випробувань. Досліджувались низьколеговані сталі з границею міцності на рівні 500...550 МПа, які застосовуються для виготовлення трубопровідних систем у газотранспортній індустрії. Для порівняння було вибрано дві типові сталі, що застосовуються для виготовлення труб газотранспортних мереж: сталь K52 – вітчизняного виробництва та сталь X52 – виробництва Європейського Союзу. Хімічний склад сталей та їх механічні характеристики наведено відповідно у табл.1 і 2.

Таблиця 2 – Механічні характеристики сталей

| Марка сталі | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % |
|---------------|------------------|----------------------|--------------|
| K52 (Україна) | 510 | 353 | 20,0 |
| X52 (ЄС) | 528 | 410 | 30,2 |

Особливістю здійснених досліджень було те, що зразки (рис. 1, 2) виготовлялись із реальних труб різних типорозмірів (див. табл. 3).

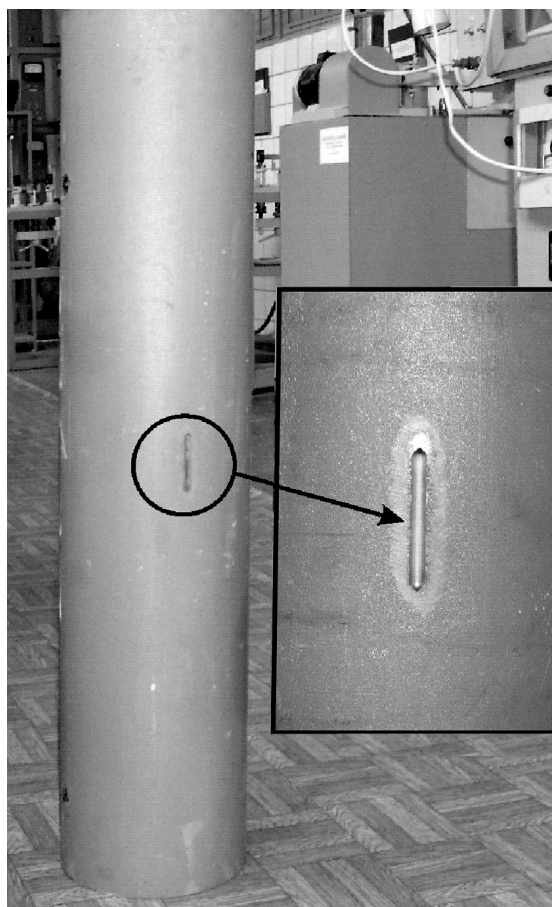


Рисунок 1 – Зразок для випробувань

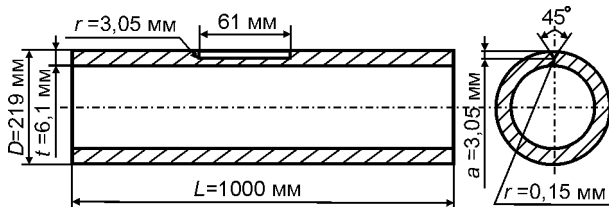


Рисунок 2 – Геометричні розміри зразка

Таблиця 3 – Типорозміри труб

| № | Зовнішній діаметр D, мм | Товщина стінки t, мм |
|---|-------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 159 | 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0 |
| 2 | 168 | 3,0; 5,5; 6,0; 7,0 |
| 3 | 219 | 6,0; 7,0; 8,0 |

Для встановлення впливу газоподібного водню на міцність та довговічність досліджуваних сталей і труби як конструктивного елемента трубопроводу була застосована така процедура випробувань (рис. 3): навантаження труби з заданою швидкістю зміни внутрішнього тиску (ділянка I) – витримування за заданого значення тиску газу (ділянка II) – подальше навантаження труби до розриву з заданою швидкістю зміни внутрішнього тиску (ділянка III).

Автоматична система для випробувань труб під внутрішнім тиском [24]. Для реалізації програми експериментальних досліджень було розроблено спеціальну камеру (рис. 4). Вона складається з трьох циліндрів: труби-зразка 1, зовнішнього циліндра 2 та внутрішнього циліндра 3. Кінці труби-зразка 1 закріплено у направляючих втулках 4, довжиною 200 мм

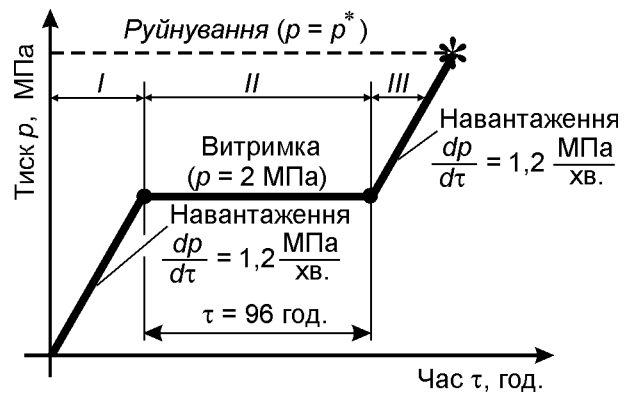


Рисунок 3 – Послідовність випробувань

кожна. Герметичність камери забезпечується спеціальними кільцевими ущільненнями 5, які знаходяться на кришках 6 та 7.

Зовнішній циліндр 2 ($d=375$ мм) відіграє роль захисного кожуха. Внутрішній циліндр 3 ($d=165$ мм) виконує технологічну функцію, зменшуючи об'єм водню всередині труби-зразка 1, що випробовується. Це зроблено з огляду на дотримання вимог правил техніки безпеки у ході проведення випробувань.

Конструктивною особливістю розробленої камери є додатковий простір між трубою-зразком 1 та захисним кожухом 2, який заповнений інертним газом (аргоном). Це дає змогу запобігти виникненню небезпечної ситуації при випробуваннях, тобто в момент розриву труби витік водню відбувається не в атмосферу, а в заповнений аргоном об'єм.

Загальний вигляд випробувальної камери наведено на рис. 5. Тут для кращого огляду захисний кожух знято.

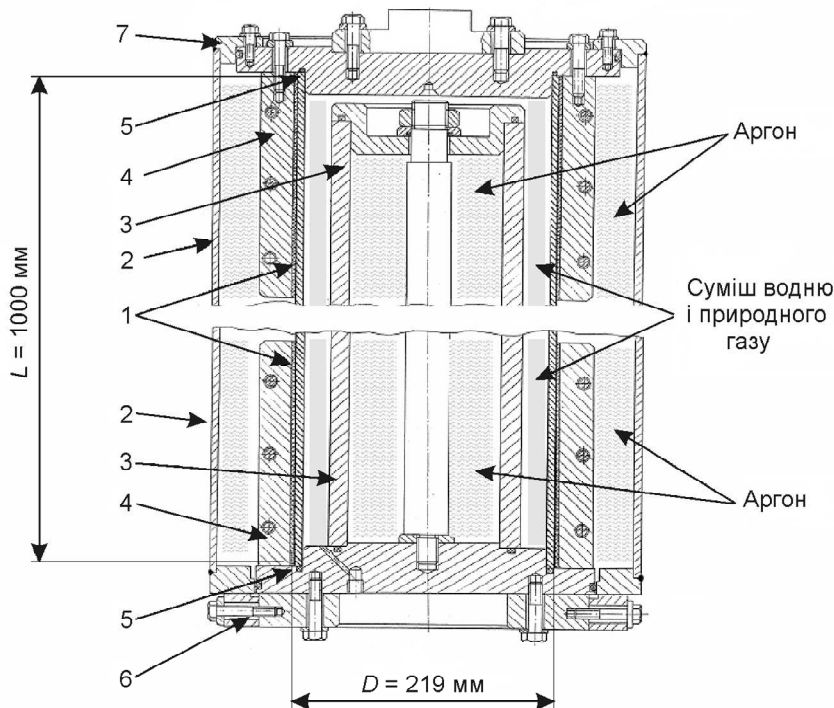


Рисунок 4 – Спеціальна робоча камера для випробувань





Рисунок 5 – Робоча та захисна камери

Загальну схему автоматичної системи для випробувань зразків-труб під тиском газоподібного водню наведено на рис. 6. Системою керує комп'ютер за спеціальною програмою, що дозволяє здійснювати випробування зразків в автоматичному режимі у такій послідовності:

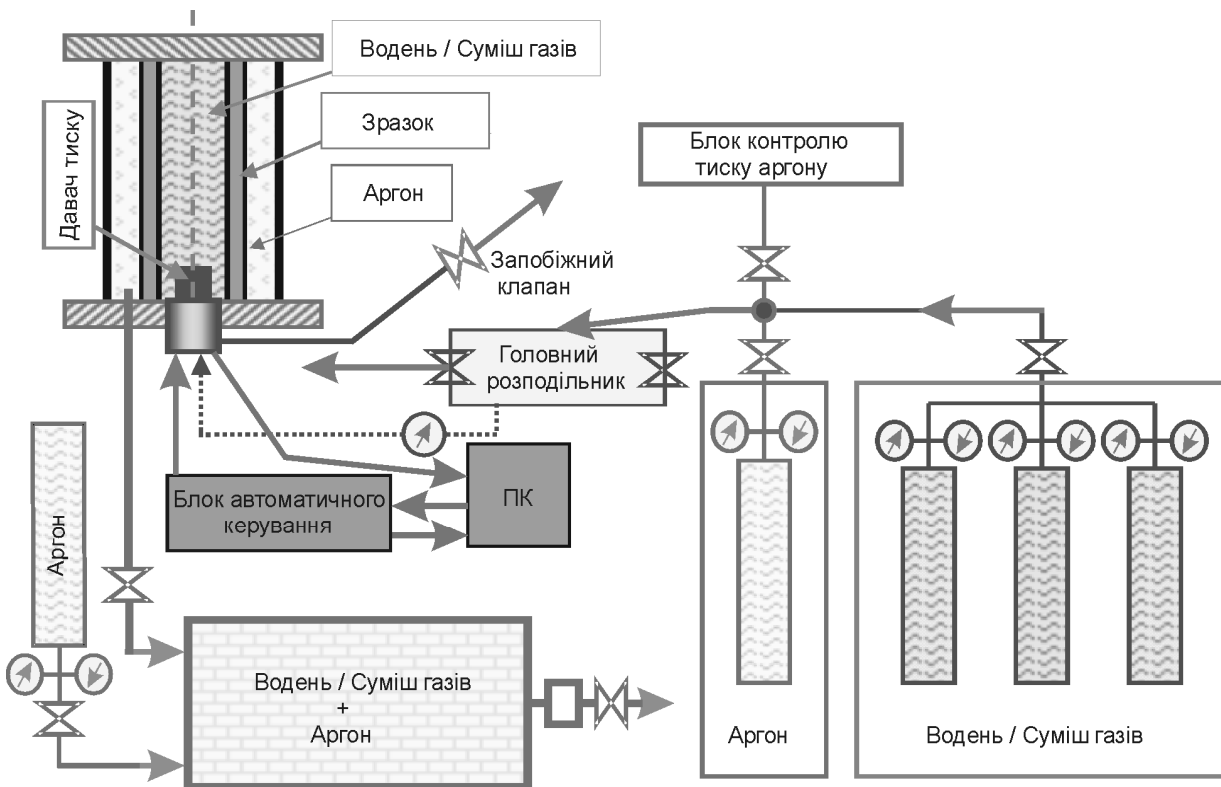


Рисунок 6 – Загальна схема автоматичної системи для випробувань зразків-труб під внутрішнім тиском газоподібного водню та метану

навантаження труби з заданою швидкістю зміни внутрішнього тиску – витримування заданого значення тиску газу, подальше навантаження труби до розриву (див. рис. 3).

Система має вибухобезпечне виконання і складається з таких основних компонентів. Клапан-засувка з електроприводом (виробництва „Клапан”, Росія) використовується для автоматичного наповнення, регулювання та підтримання заданого тиску водню всередині труби.

Спеціальний вибухобезпечний трансмітер тиску водню MBS 4251 (виробництва „Yosogawa Electric Corporation”, Японія) використовується для подачі газоподібного водню в порожнину труби.

Спеціальний вибухобезпечний трансмітер тиску небезпечних газів EJA510 (виробництва „DanFoss Electric Corporation”, Данія) використовується для автоматичної зупинки випробувань у момент розриву труби, а також для видалення відпрацьованої газової суміші з випробувальної камери.

Блок автоматичного контролю (виробництва „Schindler Electric Corporation”, Франція) керує роботою зазначених вище компонентів, за командою комп'ютера відповідно до спеціально розробленої програми.

Апробація створеного устаткування та систем. Згідно існуючих вимог, лабораторія для проведення випробувань займає два окремі приміщення. Перше приміщення призначене для засобів дистанційного управління та контролю за експериментом, а також для обслуговуючого персоналу (рис. 7). Друге – це спеціальний вибухобезпечний бокс, де розміщений випробуваний стенд (рис. 8).



Рисунок 7 – Загальний вигляд операторської для автоматичного керування випробуваннями

Балони з воднем, метаном, сумішами „водень–метан” та аргонем винесені за межі будівлі лабораторії і зберігаються в окремих боксах. З’єднувальні газові лінії виконано з трубок із нержавіючої сталі діаметром 6 мм та товщиною стінки 2 мм. Перед початком кожного випробування всі трубопроводи та порожнини дослідного устаткування очищаються від залишків повітря шляхом продування аргонем.

Лабораторія також обладнана незалежною системою безпеки „Дозор”, яка контролює загазованість приміщень і у випадку виникнення позаштатних ситуацій автоматично зупиняє процес випробування.

Автоматична випробувальна система забезпечує наступні функції:

- подавання водню в порожнину випробовуваної труби при заданій швидкості зміни внутрішнього тиску $dp/d\tau = \text{const}$;

- підтримання заданого тиску в трубі $p = \text{const}$ впродовж визначеного часу τ ;

- навантаження труби внутрішнім тиском за деякої заданої швидкості $dp/d\tau = \text{const}$ до її розриву ($p = p^*$);

- безперервну реєстрацію внутрішнього тиску в трубі впродовж всього випробування $p = \Phi(\tau)$;
- візуалізацію в реальному часі на моніторі комп’ютера функції $p = \Phi(\tau)$ для кожної стадії процесу випробування (рис. 9);

- реєстрацію моменту розриву труби і визначення руйнівного тиску $p = p^*$ (рис. 10);

- безперервну реєстрацію тиску на зовнішній поверхні випробовуваної труби (об’єм у випробувальній камері заповнений аргонем) впродовж всього випробування;

- автоматичний випуск відпрацьованої газової суміші „водень–аргон” з порожнини камери в атмосферу після розриву труби;

- аварійне вимкнення випробувальної системи і автоматичне випускання газів в атмосферу.



Рисунок 8 – Спеціальне вибухобезпечне приміщення для випробувального стенду

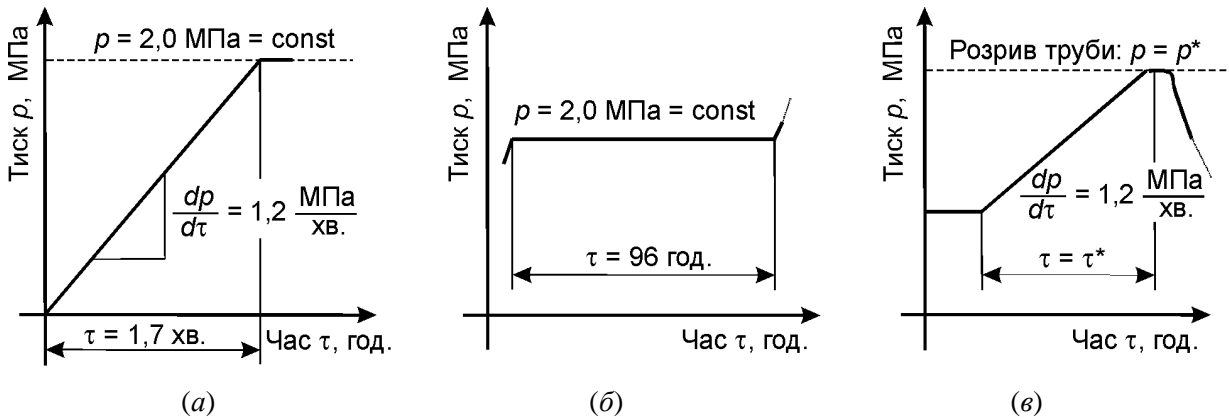


Рисунок 9 – Візуалізація функції $p = \Phi(\tau)$ на моніторі персонального комп'ютера для кожної стадії випробування

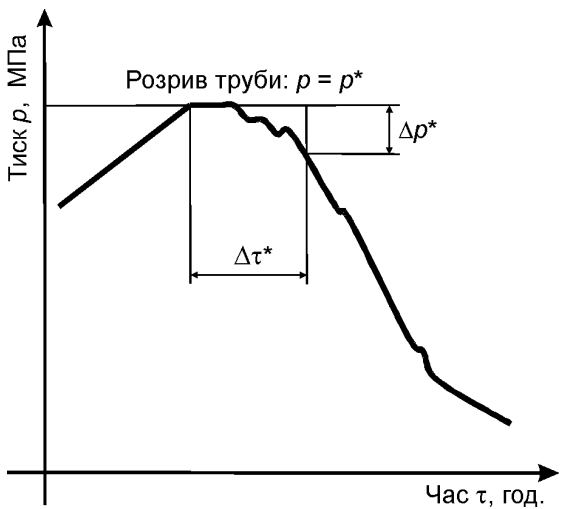


Рисунок 10 – Схема реєстрації моменту розриву труби та визначення руйнуючого тиску $p = p^*$

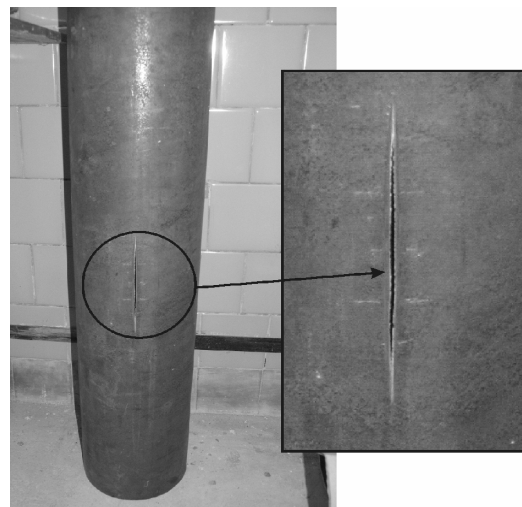


Рисунок 11 – Приклад пружно-пластичного руйнування труби

Проведення попередніх випробувань. З метою відпрацювання розробленої методики досліджень та перевірки працездатності створеного устаткування при різних режимах випробувань була проведена серія попередніх експериментів на зразках-трубах розмірами $D = 216$ мм, $t = 6$ мм, $L = 1000$ мм.

Випробовуючи на розрив труби зі сталі K52, була відпрацьована процедура експериментів та реєстрації руйнівного тиску у випадку пружно-пластичного руйнування труби (рис. 11) та крихкого катастрофічного руйнування (рис. 12). Це було досягнуто шляхом різних комбінацій параметрів швидкості зміни внутрішнього тиску в трубі та часу її витримування заданим тиском впродовж визначеного часу для концентраторів напружень різних розмірів.

Особливості руйнування труб під тиском газоподібного водню та чистого метану. Випробовували труби зі сталі X52 діаметром 219 мм та товщиною стінки 6,1 мм із зовнішніми концентраторами напружень, розташованими паралельно осі труби. Геометрію зразка та концентратора напружень наведено на рис. 1 та 2.

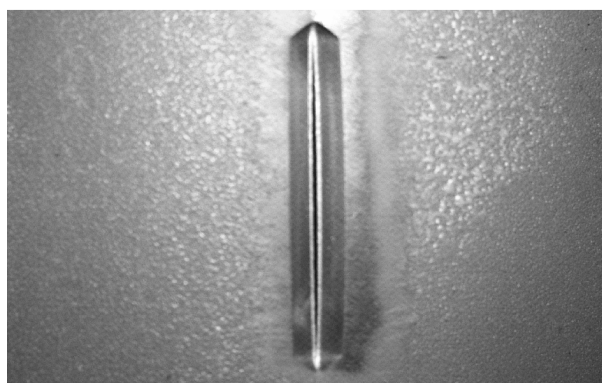
Випробування проведено за швидкості зміни внутрішнього тиску в трубі $dp/d\tau = 1,2$ МПа/хв. та попередній витримці труби під тиском $p = 2,0$ МПа впродовж 96 год. Встановлено, що руйнівний тиск $p = p^*$ для труб випробуваних у метані становив 12,2 МПа, а для труб випробуваних у водні – 11,8 МПа.

Аналіз випробуваних зразків дав змогу виявити основні відмінності особливостей руйнування сталей у присутності водню, порівняно з метаном (рис. 13 та 14).

Після випробування на розрив було здійснено вимірювання залишкової деформації труби Δ біля концентратора напружень, а також розкриття δ концентратора напружень. Схеми вимірювань наведено відповідно на рис. 15 та 17. Одержані результати показали, що залишкова деформація (оєпуклість) труби біля концентратора напружень є більшою під час випробувань у водні порівняно з випробуваннями метану (табл. 4, рис. 16). Розкриття надрізу (концентратора напружень) є також більшим після випробувань труби на розрив у водні, ніж у метані (табл. 5, рис. 18).



Рисунок 12 – Приклад крихкого руйнування труби

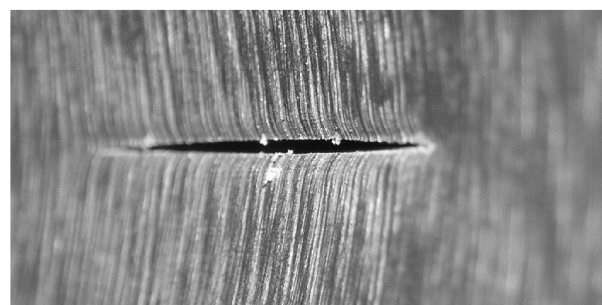
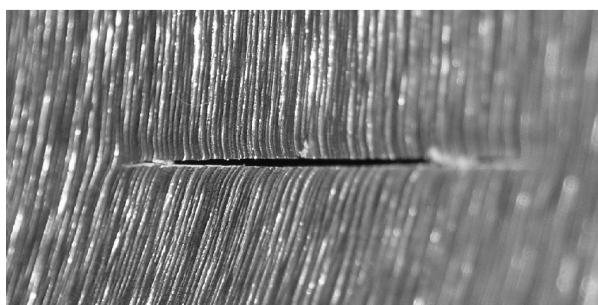


а)



б)

Рисунок 13 – Загальний вигляд розриву випробуваних у метані (а) та газоподібному водні (б) труб біля концентратора напружень – вигляд із зовнішньої сторони труби



(а)

(б)

Рисунок 14 – Загальний вигляд розриву випробуваних у метані (а) та газоподібному водні (б) труб біля концентратора напружень – вигляд із внутрішньої сторони труби

Таблиця 4 – Залишкова деформація труби біля концентратора напружень після випробувань на розрив у метані та водні

| Δ , мм | L , мм | | | | | | | | | | |
|---------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | -50 | -40 | -30 | -20 | -10 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Метан | 0,03 | 0,25 | 0,95 | 1,85 | 2,30 | 2,40 | 2,30 | 1,80 | 1,00 | 0,24 | 0,03 |
| Водень | 0,03 | 0,25 | 0,95 | 2,00 | 2,60 | 2,75 | 2,60 | 2,00 | 1,05 | 0,25 | 0,03 |

Таблиця 5 – Розкриття надрізу (концентратора напружень) після випробувань труби на розриву метані та водні

| δ , мм | a , мм | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 51,5 | 52,6 | |
| Метан | 0 | 0,34 | 0,47 | 0,53 | 0,61 | 0,60 | 0,58 | 0,55 | 0,46 | 0,20 | 0,09 | 0 | – | |
| Водень | 0 | 0,29 | 0,48 | 0,62 | 0,68 | 0,74 | 0,75 | 0,72 | 0,69 | 0,55 | 0,39 | – | 0 | |

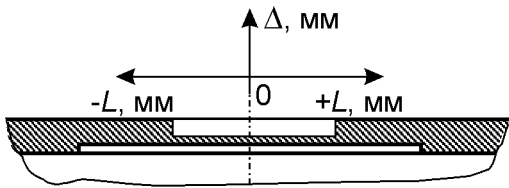


Рисунок 15 – Схема вимірювання залишкової деформації труби біля концентратора напружень

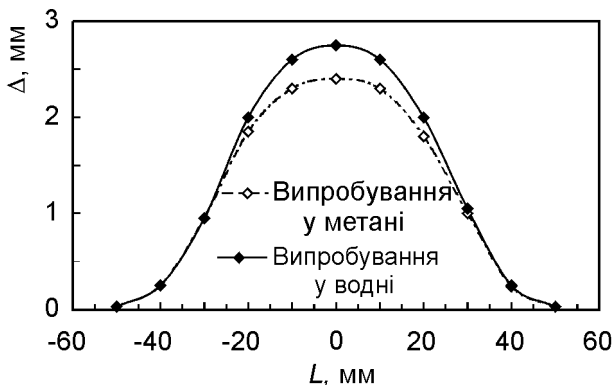


Рисунок 16 – Порівняння залишкової деформації труби біля концентратора напружень після випробувань на розрив у метані та водні

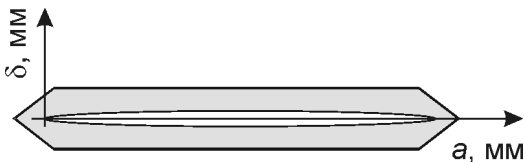


Рисунок 17 – Схема вимірювання розкриття надрізу (концентратора напружень) після випробувань труби на розрив

З одержаних результатів можна зробити опосередкований висновок про більш „крихкий” характер розриву труби біля концентратора напружень у випадку випробувань у водні порівняно з випробуваннями у метані.

Порівняльне оцінювання особливостей поверхонь руйнування труб у середовищі газоподібного водню та метані. Після проведення випробувань труб на розрив було проведено факто-

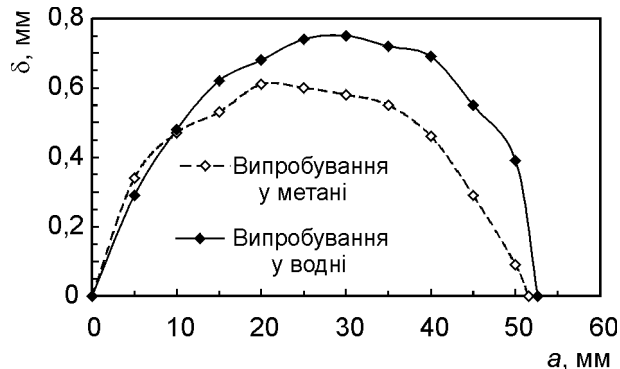


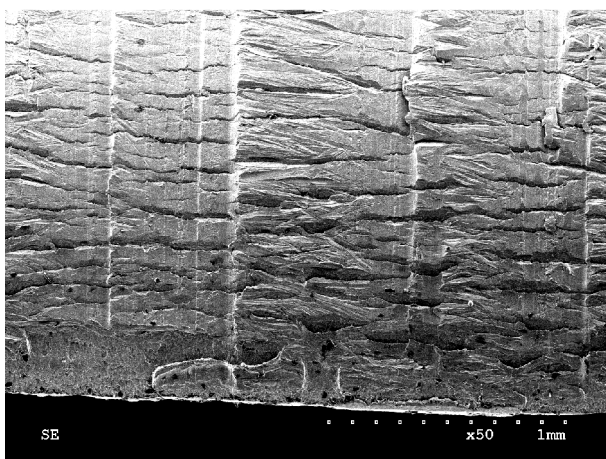
Рисунок 18 – Порівняння розкриття надрізу (концентратора напружень) після випробувань труби на розрив

графічні дослідження поверхонь їх руйнування за допомогою сканівного електронного мікроскопа. Їх порівняльне оцінювання виявило наступні особливості руйнування у середовищі газоподібного водню та метані.

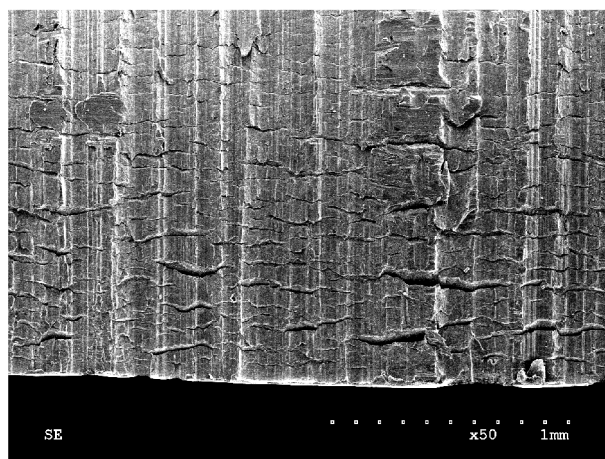
Перш за все, загальний вигляд поверхні руйнування сталі X52 за випробувань у водні характеризується мережею мікротріщин значно вищої густини, ніж у метані (рис. 19), що вказує на крихке мікророзтріскування. По-друге, морфологія поверхні руйнування сталі біля концентратора напружень за випробувань у метані має „ямковий” характер (рис. 20а), що свідчить про типовий в’язкий механізм руйнування матеріалу. У цей же час за випробувань у водні поверхня руйнування має рельєф, характерний для квазісколу, що вказує на крихке руйнування матеріалу (рис. 20б).

Слід зазначити, що одержані дані мають принципово важливе значення, оскільки вказують на потенційну можливість реалізації механізму водневого окрихчення досліджених сталей в околі концентраторів напружень, навіть за достатньо низьких тисків газоподібного водню в трубопроводі ($p = 2,0$ МПа) і температури 20 °С.

Висновки. Розроблено та апробовано оригінальне дослідне устаткування з комп’ютерним керуванням процесу випробувань на розрив конструктивних елементів трубопровідних

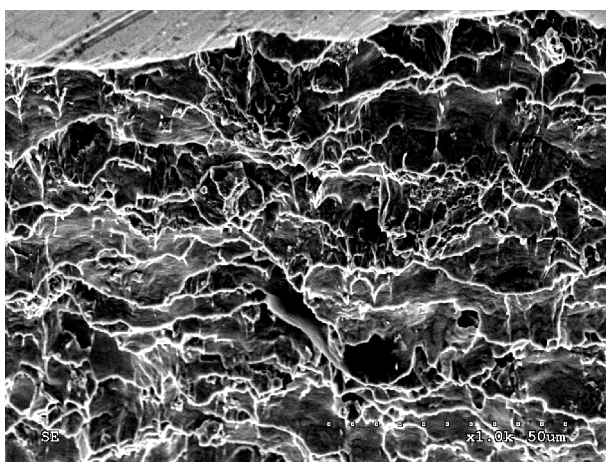


(a)

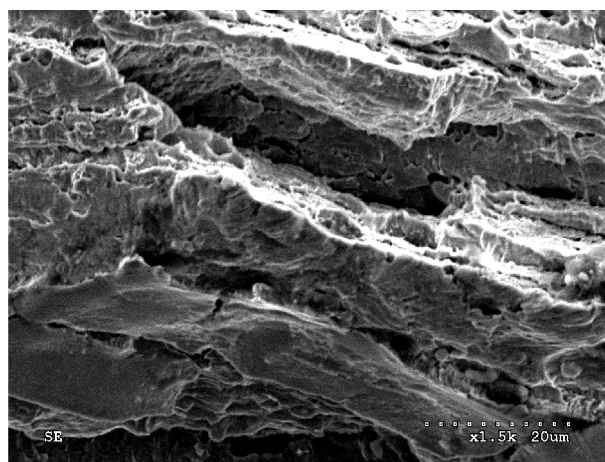


(б)

Рисунок 19 – Загальний вигляд поверхні руйнування труби біля концентратора напружень: (a) – випробування у метані; (б) – випробування у водні



(a)



(б)

Рисунок 20 – Морфологія поверхні руйнування труби біля концентратора напружень: (a) – випробування у метані; (б) – випробування у водні

систем транспортування газоподібного водню та його сумішей. Створено спеціалізовану лабораторію, яка забезпечує проведення даних досліджень в автоматичному режимі.

Одержано результати випробування труб з модельними дефектами – концентраторами напружень в умовах дії тиску газоподібного водню або метану (модель природного газу).

Показано суттєву зміну механізму руйнування труб, виготовлених із низьколегованих сталей, у присутності водню за тиску витримки до 2,0 МПа та температури 20 °С порівняно зі випробуваннями в метані, а саме, значне окрищення металу.

Запропонована методика може бути використана при встановленні критеріїв міцності та працездатності сучасних та перспективних конструкційних сталей, що експлуатуються у присутності воденьвмісних середовищ.

Література

1 Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання [Текст]: наук.-техн. посіб.: у 3-х томах / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; за ред. В.В. Панасюка. – Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2012. – 433 с.

2 Mulder G. Towards a sustainable hydrogen economy: Hydrogen pathways and infrastructure // Grietus Mulder, Jens Hetland, Guido Lenaers // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – V. 32, Is. 10–11. – P. 1324–1331.

3 NaturalHy Project, <http://www.naturalhy.net>

4 Карпенко Г.В. Влияние водорода на свойства стали / Г.В. Карпенко, Р.И. Крипякевич. – М.: Metallurgizdat, 1962. – 246 с.

5 Панасюк В.В. Модель роста трещин в деформированных металлах при воздействии водовода / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, В.С. Харин // Физико-химическая механика материалов. – 1987. – Т. 23, № 2. – С. 3–17.

6 Ткачев В.И. Работоспособность сталей и сплавов в среде водовода / В.И. Ткачев, В.И. Холодный, И.Н. Левина. – Львів: Вертикаль, 1999. – 255 с.

7 Azevedo C.R.F. Failure analysis of a crude oil pipeline / Cesar R.F. Azevedo // Engineering Failure Analysis. – 2007. – V. 14, Is. 6. – P. 978–994.

8 Cheng Y.F. Fundamentals of hydrogen evolution reaction and its implications on near-neutral pH stress corrosion cracking of pipelines / Y.F. Cheng // Electrochimica Acta. – 2007. – V. 52, Is. 7. – P. 2661–2667.

9 Dey S. Hydrogen entry into pipeline steel under freely corroding conditions in two corroding media / S. Dey, A. K. Mandhyan, S. K. Sondhi, I. Chatteraj // Corrosion Science. – 2006. – V. 48, Is. 9. – P. 2676–2688.

10 Hardie D. Hydrogen embrittlement of high strength pipeline steels / D. Hardie, E.A. Charles, A.H. Lopez // Corrosion Science. – 2006. – V. 48, Is. 12. – P. 4378–4385.

11 Hardie D. The effect of stress concentration on hydrogen embrittlement of a low alloy steel / D. Hardie, Su'e Liu // Corrosion Science. – 1996. – V. 38, Is. 5. – P. 721–733.

12 Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання [Текст]: наук.-техн. посіб.: у 3-х томах / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; за ред. В.В. Панасюка. – Т. 1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2011. – 457 с.

13 Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання [Текст]: наук.-техн. посіб.: у 3-х томах / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; за ред. В.В. Панасюка. – Т. 2: Деградація нафтопроводів і резервуарів та її запобігання. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, 2011. – 447 с.

14 Cheng Y.F. Analysis of electrochemical hydrogen permeation through X-65 pipeline steel and its implications on pipeline stress corrosion cracking / Y.F. Cheng // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – V. 32, Is. 9. – P. 1269–1276.

15 Cheng Y.F. Mechanism for hydrogen evolution reaction on pipeline steel in near-neutral pH solution / Y.F. Cheng, L. Niu // Electrochemistry Communications. – 2007. – V. 9, Is. 4. – P. 558–562.

16 Mao S.X. Mechanics and thermodynamics on the stress and hydrogen interaction in crack tip stress corrosion: experiment and theory / Scott X. Mao, M. Li // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1998. – V. 46, Is. 6. – P. 1125–1137.

17 Yan M. Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging / Maocheng Yan, Yongji Weng // Corrosion Science. – 2006. – V. 48, Is. 2. – P. 432–444.

18 Shipilov S.A. Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection / Sergei A. Shipilov, Iain Le May // Engineering Failure Analysis. – 2006. – V. 13, Is. 7. – P. 1159–1176.

19 Dey S. Study on hydrogen absorption of pipeline steel under cathodic charging / Maocheng Yan, Yongji Weng // Corrosion Science. – 2006. – V. 48, Is. 2. – P. 432–444.

20 Hardie D. Effect of hydrogen and strain rate upon the ductility of mill-annealed Ti6Al4V / D. Hardie, S. Ouyang // Corrosion Science. – 1999. – V. 41, Is. 1. – P. 155–177.

21 Ibeh B. Separation of hydrogen from a hydrogen/methane mixture using a PEM fuel cell / Blessing Ibeh, Chris Gardner, Marten Ternan // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – V. 32, Is. 7. – P. 908–914.

22 Murakami Y. The effect of hydrogen on fatigue properties of steels used for fuel cell system / Yukitaka Murakami, Hisao Matsunaga // International Journal of Fatigue. – 2006. – V. 28, Is. 11. – P. 1509–1520.

23 Capelle J. A fatigue initiation parameter for gas pipe steel submitted to hydrogen absorption / J. Capelle, J. Gilgert, G. Pluvinaige // International Journal of Hydrogen Energy. – 2010. – V. 35, Is. 2. – P. 833–843.

24 Пат. України на корисну модель №57275, МПК (2011.01): G01N 13/00. Стенд для оцінки міцності та руйнування труб під внутрішнім тиском газоподібних середовищ / Лутицький О.Л., Дмитрах І.М., Вовк Р.І., Студент О.З., Білий О.Л.; власник: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – u 2010 03384; заявл. 23.03.2010; опубл. 25.02.2011, Бюл. № 4.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
15.11.13*

*Рекомендована до друку
професором **Петриною Ю.Д.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
д-ром техн. наук **Никифорчиним Г.М.**
(Відділ корозійно-водневої деградації та захисту
матеріалів Фізико-механічного інституту
ім. Г.В.Карпенка НАН України, м. Львів)*