

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ПОШКОДЖУВАНOSTI ЕЛЕМЕНТІВ ГНУЧКИХ ТРУБ КОЛТЮБІНГОВИХ УСТАНОВОК

<sup>1</sup>А.М. Сиротюк, <sup>2</sup>О.Ю. Витязь, <sup>1</sup>Р.А. Барна, <sup>2</sup>В.В. Турлич

<sup>1</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України; 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5, тел. (0322) 631400; e-mail: s y r o t y u k @ i p t m . l v i v . u a

<sup>2</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727182, e-mail: v y t y a z @ n u n g . e d u . u a

Грунтуючись на експериментально-розрахункових підходах механіки руйнування і міцності матеріалів, а також матеріалознавства, запропоновано та апробовано методика дослідження поверхневої пошкоджуваності сталей гнучких труб, що реалізується шляхом зародження та подальшого розвитку поверхневих тріщиноподібних дефектів за дії циклічних навантажень. Методика враховує специфіку навантажень, що виникають під час експлуатації колтюбінгової установки, а також вплив робочих агресивних середовищ: технологічних – всередині труби та пластових вод – зовні труби.

Розроблено геометрію зразків для випробувань на міцність та довговічність елементів гнучких труб з врахуванням дії експлуатаційних чинників, а також модифіковано та апробовано необхідне дослідне устаткування для проведення таких досліджень. Запропонована методика дозволяє встановлювати основні стадії процесу руйнування гнучких труб, тобто період зародження початкової пошкоджуваності матеріалу, період утворення поверхневих тріщиноподібних дефектів, а також їх подальший розвиток до руйнування труби.

Одержано результати попередніх випробувань елементів гнучких труб із зовнішнім діаметром 38,10 мм і товщиною стінки 2,95 мм, які виготовлено зі сталі марки А606 з межею міцності 793 МПа та межею пластичності 672 МПа. Зокрема, для внутрішньої поверхні таких труб побудовано експериментальні залежності „довжина поверхневого тріщиноподібного дефекту – кількість циклів навантаження” за різних значень амплітуди циклічного навантаження.

Ключові слова: колтюбінгові технології; гнучкі труби; конструкційні низьколеговані сталі; циклічні навантаження; агресивні робочі середовища; поверхневе тріщиноутворення.

Базируясь на экспериментально-расчетных подходах механики разрушения и прочности материалов и материаловедения, предложена и апробирована методика исследования поверхностной повреждаемости сталей гибких труб, которая реализуется путем зарождения и дальнейшего развития, поверхностных трещиноподобных дефектов при действии циклических нагрузок. Методика учитывает специфику нагрузок, возникающих при эксплуатации колтюбинговой установки, а также влияние рабочих агрессивных сред: технологических – внутри трубы и пластовых вод – снаружи трубы.

Разработана геометрия образцов для испытаний на прочность и долговечность гибких труб с учетом действия эксплуатационных факторов, а также модифицировано и апробировано необходимое испытательное оборудование для проведения таких исследований. Предложенная методика позволяет устанавливать основные стадии процесса разрушения гибких труб, т.е. период зарождения начальной повреждаемости, период образования поверхностных трещиноподобных дефектов, а также их дальнейшее развитие до разрушения трубы.

Получены результаты предварительных испытаний элементов гибких труб с внешним диаметром 38,10 мм и толщиной стенки 2,95 мм, которые изготовлены из стали марки А606 с пределом прочности 793 МПа и пределом текучести 672 МПа. В частности, для внутренней поверхности таких труб построены экспериментальные зависимости „длина поверхностного трещиноподобного дефекта – число циклов нагружения” для разных значений амплитуды циклического нагружения.

Ключевые слова: колтюбинговые технологии, гибкие трубы, конструкционные низколегированные стали, циклические нагрузки, агрессивные рабочие среды, поверхностное трещинообразование.

Based on the experimental-calculation approaches of fracture mechanics, strength of materials and also the materials science, the method for surface damaging study of flexible pipe steels that is realized by the way of nucleation and further development of surface crack-like defects under cyclic loading has been proposed and approbated. The method takes into account the specific characteristics of loading that is arisen under operation of coiled tubing equipment and also the influence of aggressive working environments: technological – inside pipe and reservoir water – outside pipe. The geometry of specimens for strength and durability testing of flexible pipe elements, taking into account the operating factors has been developed and required testing equipments have been modified and verified. The proposed method gives the possibility to define the main stages of pipe fracture process, i.e. the period of early damaging of material, the period of surface crack-like defects initiation and also their further propagation up to pipe failure. The results of preliminary tests of the elements of flexible pipes with outer diameter of 38,10 mm and wall thickness of 2,95 mm manufactured with steel grade А606 (ultimate strength is 748 МПа and yield stress is 628 МПа) have been received. In particular, the dependencies „length of surface crack-like defect – number of loading cycles” under different values of cyclic loading amplitude have been built for internal surface of these pipes.

Keywords: coiled tubing technologies, flexible pipes, structural low-alloyed steels, cyclic loadings, aggressive operating environments, surface cracking.

**Вступ.** Однією із основних сучасних тенденцій світової газової та нафтової індустрії є підвищення ефективності видобутку вуглеводневої сировини. На сьогодні відомі різні способи та технології збільшення ефективності газонафтовидобування, це – вплив на пластові поклади, застосування нових технологій буріння свердловин, застосування сучасного устаткування для капітального ремонту та відновлення свердловин, тощо.

Однак, особливе місце серед вищенаведених способів займають так звані „колтюбінгові” (Coiled Tubing) технології, які ґрунтуються на застосуванні гнучких труб (ГТ). Ці технології відзначаються високою економічною ефективністю, перебувають у стані неперервного розвитку та вдосконалення і для координації цих зусиль існує відповідна міжнародна асоціація (International Coiled Tubing Association).

Колтюбінгові технології застосовують для широкого спектру операцій: буріння горизонтальних і похило-спрямованих свердловин; очищення стовбура свердловини; промивання відкладень парафіну; витіснення бурового розчину; видалення рідини зі свердловини; фрезерування відкладень корозивних солей; кислотної обробки призабійної зони пласта; розширення стовбура свердловини; цементування під тиском; закачування інгібіторів і розчинників; дослідження чи глушіння свердловин; очищення насосно-компресорних труб і трубопроводів; прокладання викидних ліній; закачування пластових вод та підтримання пластового тиску, тощо.

У технологічному устаткуванні ГТ працюють у пружно-пластичній області деформування, але в результаті тривалої експлуатації відбувається локальне руйнування труб, що призводить до виникнення аварійних ситуацій. Виникнення поломок зумовлене багатьма експлуатаційними чинниками. Однак, як свідчить інженерна практика, в основному це циклічні згинальні навантаження за сумісної дії агресивних робочих середовищ (технологічних – всередині труби та пластових вод – назовні труби). Таким чином, розроблення методів підвищення надійності та довговічності ГТ для газонафтовидобування за колтюбінговими технологіями є актуальною науковою та науково-технічною задачею.

#### **Аналіз сучасних досліджень і публікацій.**

Щоб запропонувати ефективну методику дослідження пошкоджуваності елементів ГТ колтюбінгових установок потрібно запропонувати підходи, що враховують деградацію їх властивостей за дії експлуатаційних чинників (циклічне навантаження, агресивне середовище, температура, тощо). У літературі наведено низку рекомендацій, щодо вдосконалення технології виготовлення ГТ, методів їх випробування, оцінювання технічного стану та обґрунтування безпечного терміну експлуатації ГТ колтюбінгових установок. Деякі з них наведено нижче.

Автор [1] зазначає, що однією з базових характеристик, що визначають термін безава-

рійної роботи ГТ в умовах циклічних знакозмінних навантажень, є пластичність матеріалу, і, зокрема, відносне видовження за розтяг. Вимога споживачів підвищити міцнісні характеристики сталей для виготовлення ГТ суперечить вимогам збільшення терміну експлуатації ГТ, оскільки загальновідомо [2], що зі збільшенням міцності помітно знижується пластичність сталей.

Тут виявлено, що підвищених міцнісних характеристик ГТ, зокрема, високої міцності за статичних і циклічних навантажень, можна домогтися, застосовуючи для їх виготовлення високоміцні низьколеговані сталі після термічної обробки, що включає гартування і відпуск. Вміст хрому і молібдену сприяє гартуванню таких сталей. Водночас ГТ виготовлені з таких сталей важко ремонтувати в експлуатаційних умовах, оскільки виконані під час ремонтних робіт зварні з'єднання зумовлюють локальний відпуск, і, відповідно, зниження межі плинності. Також помічено тенденцію до зменшення кількості поперечних зварних з'єднань у ГТ з метою підвищення термінів експлуатації ГТ у колтюбінгових установках.

У праці [3] проаналізовано та систематизовано ряд чинників, що впливають на термін експлуатації ГТ, наприклад: діаметр і товщина стінки ГТ, технологічний тиск під час колтюбінгових операцій, механічні пошкодження зовнішньої поверхні труби, корозія, тощо. Промивання свердловини супроводжується періодичною зупинкою спуску труби, її підйомом на незначну відстань і повторним спуском. При цьому змінюються внутрішній тиск у трубі, температура навколишнього середовища, тощо, що не завжди фіксують прилади і оператори, а, отже, ці моменти не враховують при аналізуванні причин руйнування труб. Небажано використовувати плашки транспортера з насічкою, оскільки такі механічні пошкодження є концентраторами напружень на зовнішній поверхні труб. Терміни та умови зберігання ГТ також впливають на термін експлуатації.

У [4] проаналізовано і узагальнено сучасні наукові та інженерні підходи механіки руйнування і міцності матеріалів до оцінювання працездатності та залишкової довговічності дефектних елементів конструкцій тривалої експлуатації за умов появи гострокінцевих концентраторів напружень.

Автор роботи [5] запропонував безконтактні неруйнівні випробування для оцінювання втомної міцності ГТ, зокрема показано, як прогнозувати залишкову міцність за геометричними розмірами виявлених поверхневих дефектів.

У праці [6] зазначено, що довговічність ГТ залежить як від механічних властивостей труб, так і від умов їх експлуатації, зокрема: параметрів циклічного навантаження при колтюбінгових операціях, внутрішнього тиску в трубах, активності корозійних процесів з врахуванням експлуатаційних напружень, зменшення товщини стінки за рахунок тертя труби до стінки свердловини при спуско-підйомних операціях, механічних пошкоджень поверхні труби (рис-

ки, задири, тощо), наявності зварних з'єднань, неметалевих включень у сталі.

У [7] запропоновано використовувати тривимірні лазерні зображення для контролю стану поверхні ГТ, зокрема, для отримання інформації щодо глибини, ширини, довжини і площі дефектів. Технології, що базуються на розсіюванні магнітного потоку, не показують геометрію пошкоджень, а за допомогою лазерів можна визначити геометричні параметри пошкоджень і оцінити їх допустимі розміри або критичні розміри дефектів, за яких відбувається катастрофічне руйнування.

У праці [8] зазначено, що основною причиною виходу з ладу ГТ є утворення на зовнішній поверхні труб тріщин, які перетворюються в наскрізні. Це, на думку авторів, відбувається через окрихчення металу в процесі експлуатації внаслідок зростання його межі міцності і зменшення пластичності. Оскільки межа плинності і твердість металу пов'язані між собою, запропоновано оцінювати термін служби труб, вимірюючи їх твердість після 10–20 спускопідіймальних операцій. У цій же роботі зазначено, що у процесі експлуатації ГТ навантажені згинальним моментом, повздовжньою силою і крутним моментом, що може спричинити втрату стійкості колони труб і набуті спіралевидної або хвилеподібної форми.

У [9] розглянуто основні відомості про корозію, корозійно-механічне руйнування, тріщиностійкість і водневу крихкість конструкційних сталей. Подано методи розрахунку конструкційної міцності труб з корозійними дефектами.

Окрім цього, у літературі наведено відомості і про натурні випробування ГТ. Так, наприклад, в університеті Талса, штат Оклахома, США (Tyumen State O&G University, USA) створено Консорціум з дослідження фізико-механічних властивостей ГТ [10]. Працівник цього університету Стивен Тіптон (Steven Tipton) розробив алгоритми для визначення терміну експлуатації ГТ, а в університеті сконструйовано та апробовано дослідну машину для випробувань ГТ. Багато компаній, в тому числі компанія Шлюмберже (Schlumberger), використовують алгоритм Тіптона для визначення терміну експлуатації ГТ.

У праці [11] описано розроблену випробувальну установку для оцінювання втомної довговічності труб діаметрами до 3,5 дюймів за тиску 10000 psi і осьової навантаженні до 120000 футів.

У [12] зазначено, що втомні випробування ГТ – дорогавартісна і тривала процедура, тому запропоновано методику випробувань за пришвидшеною процедурою. Тут досягнуто швидкість одноразового згину до 10 циклів на хвилину при радіусі згину 1200 мм, і в двічі більша швидкість при згині з радіусом 2400 мм.

Проаналізувавши низку існуючих підходів, нами розроблено та апробовано нову лабораторну методику дослідження поверхневої пошкоджуваності елементів ГТ, що реалізується шляхом зародження та подальшого розвитку пове-

рхневих тріщиноподібних дефектів за циклічних навантажень. На сьогодні в спеціалізованій науковій та науково-технічній літературі вичувенню цієї проблеми приділено недостатньо уваги. У наведених вище працях практично відсутній належний розгляд впливу чинників агресивних робочих середовищ. Результати наведених досліджень дають інтегральну картину процесу втомного руйнування матеріалу і не дозволяють встановити його стадійність, тобто зародження початкової пошкоджуваності матеріалу, утворення поверхневих тріщиноподібних дефектів та їх розвиток до руйнування труби. Таким чином, критерії міцності та довговічності ГТ, що побудовано за такими даними є недостатніми і не можуть вважатися надійними для прогнозування безпечної роботи колтубінгових установок та запобігання виникненню аварійних ситуацій за їх довготривалої експлуатації.

Запропонований нами методичний підхід усуває цей принциповий недолік, оскільки дає можливість встановити основні „лімітуючі” стадії процесу поверхневого руйнування, які визначають довговічність ГТ в експлуатаційних умовах.

### Формулювання цілей статті

*Метою* цієї роботи розроблення та апробація методики дослідження поверхневої пошкоджуваності елементів ГТ, що реалізується шляхом зародження та подальшого розвитку поверхневих тріщиноподібних дефектів за циклічних навантажень.

Досягнення поставленої мети вимагало вирішення таких *задач*:

проаналізувати існуючі методичні підходи дослідження поверхневої пошкоджуваності елементів ГТ колтубінгових установок;

запропонувати методику дослідження початкових стадій руйнування матеріалів на циклічно деформованій поверхні елементів ГТ;

шляхом проведення попередніх досліджень пошкоджуваності елементів ГТ здійснити апробацію запропонованих методик дослідження та зразків.

*Об'єкт дослідження*: процес руйнування елементів ГТ, що реалізується шляхом зародження та подальшого розвитку поверхневих тріщиноподібних дефектів за циклічних навантажень.

*Методи дослідження*: експериментально-розрахункові підходи механіки руйнування і міцності матеріалів, а також матеріалознавства.

### Виклад основного матеріалу

*Методика та устаткування для випробувань матеріалів гнучких труб за сумісної дії циклічних навантажень та робочих середовищ.*

Використовуючи експериментальну базу Фізико-механічного інституту імені Г.В. Карпенка НАН України [13, 14], створено спеціальну дослідну установку для визначення фізико-механічних та електрохімічних характеристик процесів зародження та розвитку поверхневих дефектів, а також корозійно-втомних тріщин на циклічно-деформованих металевих

Таблиця 1 – Хімічний склад сталі А606 тип 4 (мас. %) [15]

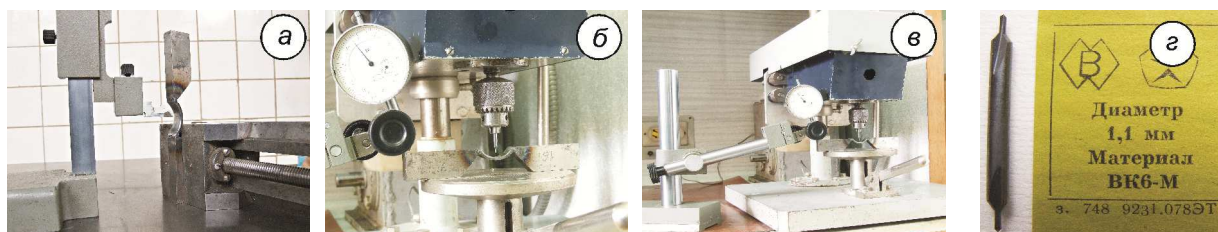
Тип сталі	Хімічний склад сталі, % вагових								
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Mo
Модифікована ASTM A606 Тип 4	0,08–0,15	0,60–0,90	0,030 max	0,005 max	0,30–0,50	0,45–0,70	0,25 max	0,40 max	0,21 max

Таблиця 2 – Механічні властивості сталі А606 тип 4 [15]

$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %
793	672	8,5	45,7



Рисунок 1 – Загальний вигляд зразка для дослідження зародження та розвитку поверхневих тріщиноподібних дефектів за циклічних навантажень



а – визначення місця розміщення концентратора;  
б, в – висвердлювання ямки глибиною 0,1 мм; г – свердло

Рисунок 2 – Методика нанесення концентратора напружень на поверхні дослідного зразка:

поверхнях за дії корозійно-активних середовищ. Дане обладнання та запропонована нижче методика досліджень дасть можливість провести комплекс експериментальних фізико-механічних досліджень особливостей початкової пошкоджуваності та поверхневого тріщиноутворення у сталях для виготовлення ГТ. Особливу увагу на подальших етапах роботи буде приділено встановленню впливу хімічного складу робочих середовищ (технологічних – всередині труби та пластових вод – назовні труби) та їх температури. Базуючись на результатах досліджень, можна встановити взаємозв'язок між амплітудою прикладених циклічних навантажень, параметрами агресивного робочого середовища (рН, температура) і процесами тріщиноутворення у матеріалах ГТ.

*Матеріали та послідовність випробувань.* Випробовували зразки зі сталі А606 тип 4, що застосовують для виготовлення ГТ колтюбінгових установок. Це високоміцна низьколегована сталь, яка забезпечує хорошу зварюваність, корозійну стійкість, втомну міцність та високі механічні властивості. Її хімічний склад наведено в табл. 1, а механічні властивості – у табл. 2.

Всі базові фізико-механічні дослідження процесів зародження та розвитку поверхневих тріщиноподібних дефектів виконано на балкових зразках, у середній частині яких приварено сегменти (рис. 1) вирізані з ГТ. Такий вибір конфігурації зразка зумовлено врахуванням технології виготовлення елемента труби.

Окрім того, для локалізації процесу зародження тріщини, за спеціальною розробленою методикою (рис. 2) наносився концентратор напружень, який моделював корозійне пошкодження типу пітингу. Для цього на гладкій полірованій поверхні зразка висвердлювалась ямка глибиною 0,1 мм.

Програму експериментальних досліджень реалізовано з використанням спеціальної дослідної установки [13], яка дає змогу проводити випробування у повітрі, а також в умовах корозійної втоми та базується на випробуваннях балкових зразків за циклічного навантаження в умовах чистого згину (рис. 3).

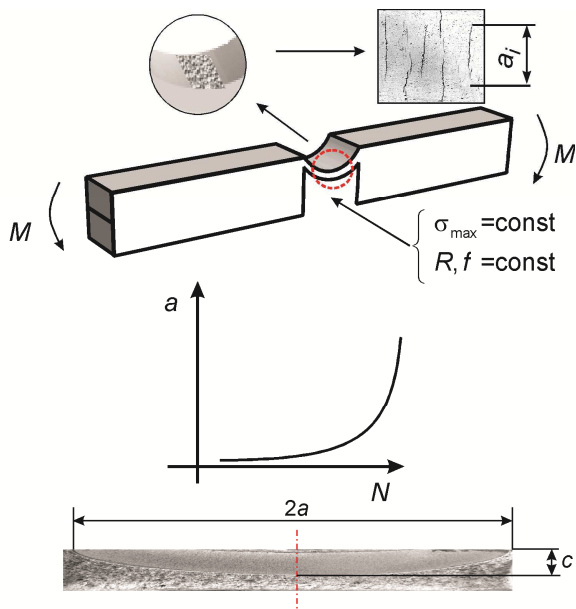
Всі випробування виконано за кімнатної температури та постійних умовах циклічного навантаження: форма циклу – синусоїдальна; частота навантаження  $f = 1$  Гц; коефіцієнт асиметрії циклу  $R = 0$ , амплітуда навантажень  $\Delta\sigma = \sigma_T = 672$  МПа.





**Рисунок 3 – Загальний вигляд установки для випробування балкових зразків за циклічного навантаження в умовах чистого згину**

Базові параметри процесів поверхневої корозійно-механічної пошкоджуваності та тріщиноутворення у сталях гнучких труб. Методологічною основою роботи є одночасне врахування фізико-механічних та фізико-хімічних процесів (рис. 4), що спричиняють корозійно-механічну пошкоджуваність та поверхневе тріщиноутворення в конструкційних сталях. Такий підхід є ефективним та фізично обґрунтованим при визначенні стандартних характеристик корозійної тріщиностійкості конструкційних металів та сплавів [13].



**Рисунок 4 – Схематичне представлення параметрів, що контролювались у процесі дослідження**

Тому у процесі кожного випробування контролюють та реєструють такі параметри [14]: максимальне напруження циклу навантаження

$\sigma_{\max}$ ; коефіцієнт асиметрії  $R$  та частота навантаження  $f$ ; число циклів навантаження  $N$ ; довжина поверхневих тріщин  $a$ ; зображення досліджуваної поверхні (рис. 4).

Надалі це дасть змогу достатньо повно охарактеризувати досліджувану систему „матеріал – середовище” як з фізико-механічної, так і з фізико-хімічної сторони, і побудувати на цій основі адекватну модельну схему та встановити критерій поверхневого тріщиноутворення за циклічного деформування досліджуваних матеріалів ГТ в експлуатаційних умовах.

*Фізико-механічні методи дослідження початкових стадій руйнування матеріалів на циклічно деформованій поверхні сталей ГТ.* Зразки випробовували до повного руйнування (рис. 5) з подальшим аналізом поверхонь зламів. Стадія початкового пошкодження поверхні та зародження тріщиноподібних дефектів, а також стадія розвитку поверхневих тріщиноподібних дефектів вивчалась за допомогою методу пластичних реплік [16, 17]. Реплікаційним матеріалом служила целолюзоацетатна плівка (марка G255 виробництва фірми AGAR SCIENTIFIC, Велика Британія) товщиною 35 мкм. Дана плівка є легкорозчинною в ацетоні. Методика виконання цього дослідження полягає в наступному. Досліджувану поверхню перед експериментом ретельно зачищають та шліфують до стану ювенільності. Після цього змочують її ацетоном високого очищення і на ще вологу поверхню накладають реплікаційну плівку певного розміру, внаслідок чого плівка приклеюється до поверхні. Через 5...7 хв. плівка відстає від поверхні, зберігаючи на собі детальний відбиток досліджуваної поверхні. Одержані в процесі дослідження відбитки аналізували за допомогою спеціальної системи [13], що складається з мікроскопа, фотоапарата та персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням. Дана система дає можливість фіксувати зображення досліджуваної поверхні в електронному варіанті (рис. 6), а також вимірювати лінійні розміри, площу та розташування існуючих на поверхні пошкоджень та тріщиноподібних дефектів. Точність вимірювання лінійних розмірів складає  $\pm 10$  мкм. Це дало змогу детально, якісно і кількісно дослідити кінетику зародження та розвитку поверхневих тріщиноподібних дефектів, за заданих умов випробування.

Крім цього, зареєстровані в комп'ютері зображення поверхні руйнування, що відповідають різним стадіям досліджуваних процесів, можуть бути використані як зразки при ідентифікації умов руйнування реальних елементів ГТ в експлуатаційних умовах.

*Інші методи дослідження.* Необхідні для реалізації завдань роботи металографічні та фрактографічні дослідження виконано у Центрі колективного користування науковими приладами (ЦККНП) „Центр електронної мікроскопії та рентгенівського мікροаналізу” НАН України (див. [www.ipm.lviv.ua](http://www.ipm.lviv.ua)), що функціонує на базі Фізико-механічного інституту НАН України і обладнаний сучасним науковим обладнанням



Рисунок 5 – Загальний вигляд зразка зі сталі А606 тип 4 після випробувань

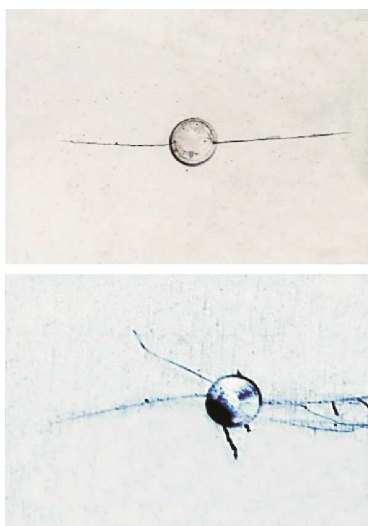


Рисунок 6 – Характерні приклади мікропошкоджуваності та зародження тріщин на циклічно деформованій металевій поверхні ГТ

виробництва фірм Carl Zeiss (Німеччина) та Oxford Instruments (Велика Британія).

Дослідження пошкоджуваності сталей гнучких труб. Кінетику розвитку поверхневих втомних тріщин у сталі аналізували на основі залежності „довжина тріщини  $a$  – кількість циклів навантаження  $N$ ”, яку було побудовано за результатами випробувань у повітрі. Одержано результати попередніх випробувань елементів гнучких труб із зовнішнім діаметром 38,10 мм і товщиною стінки 2,95 мм, які виготовлено зі сталі марки А606 тип 4 з межею міцності 793 МПа та межею плинності 672 МПа. Тріщина зародилась після  $\approx 460$  тис. циклів навантаження з нанесеного концентратора напружень (рис. 7), який моделює корозійне пошкодження типу пітинга. Вийшовши з концентратора на поверхню зразка, тріщина поширювалась по обидва його боки, практично рівномірно.

Зразок зруйнувався після 595 тис. циклів навантаження, коли тріщина поширилась на всю ширину випробовуваного зразка та вийшла на його бокову поверхню, і почала розвиватись вглиб матеріалу.

Результати проведених експериментальних досліджень свідчать, що для всіх випадків випробувань сталі А606 тип 4 утворені на циклічно деформованій поверхні макротріщини мають форму близьку до півеліптичної зі співвідношенням півосей  $c/a \approx 0,10 \dots 0,15$  (рис. 8). У подальшому такі тріщини розвиваються в глибину матеріалу.

При розробці інженерних підходів до оцінювання втомного поверхневого тріщиноутворення сталей ГТ необхідні певні спрощення та схематизація процесів, що розглядаються.

За допомогою фрактографічних досліджень виявлено типову картину руйнування низьколегованої сталі у повітрі. Тріщини зароджувалися від нанесеного концентратора напружень (рис. 9) і поширювалися в глибину перерізу зразка. При цьому на зламі формувалися фестони (рис. 9а), поперек яких розташовувалися втомні борозенки (рис. 9б). Характерною ознакою втомного рельєфу є вторинне розтріскування вздовж втомних боріздок, які

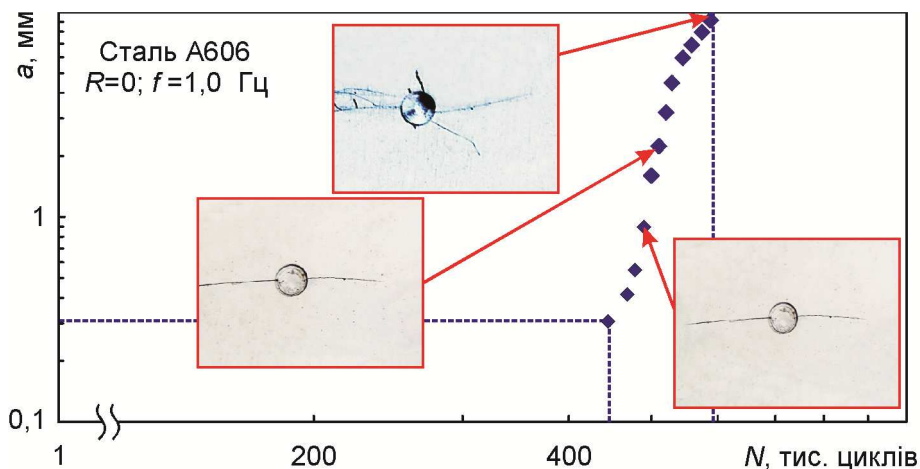


Рисунок 7 – Довжина поверхневої втомної тріщини як функція кількості циклів навантаження  $N$  за випробувань у повітрі



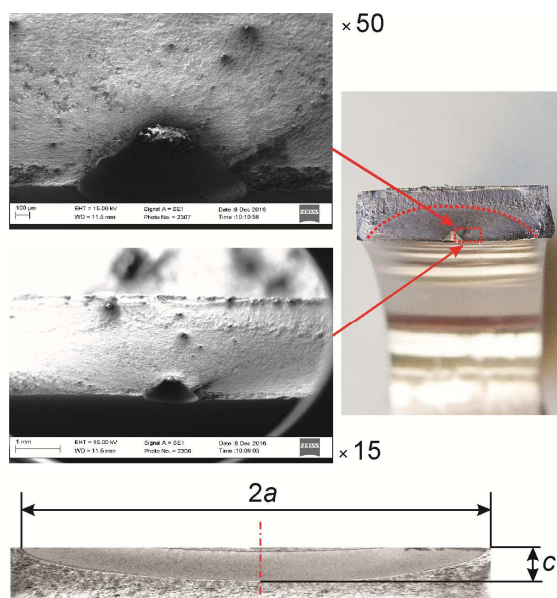
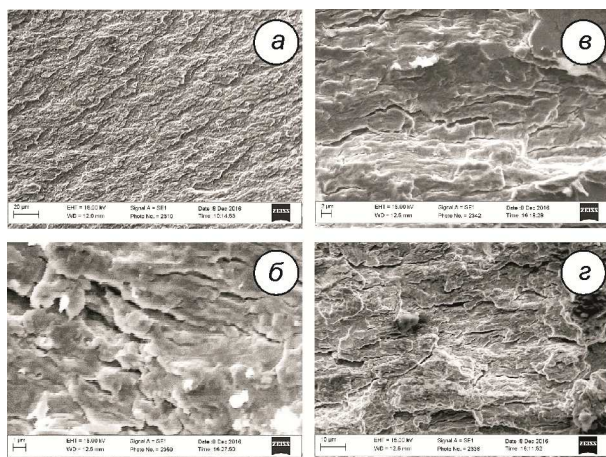


Рисунок 8 – Зародження тріщини від нанесеного концентратора напружень



$a - \times 500$ ;  $б - \times 5000$ ;  $в - \times 2000$ ;  $г - \times 1000$

Рисунок 9 – Поверхні втомного руйнування сталі А606 тип 4 у повітрі

контрастно відтінюють їх (рис. 9в). Крок цих борозенок зростає у міру просування тріщини від концентратора на зразку до остаточного його руйнування. Гребені відриву між суміжними фестонами на злами в основному мали сліди наклепу через невідповідність впадин і виступів під час контактування берегів тріщини в циклі навантаження (рис. 9г). Спонтанне руйнування зразка відбувалося за типовим в'язким руйнуванням шляхом зародження порожнин, їх подальшого росту та злиття з утворенням на поверхні ямкового рельєфу.

### Висновки

Запропоновано та апробовано методику дослідження поверхневої пошкодженості сталей гнучких труб, що реалізуються шляхом зародження та подальшого розвитку поверхневих тріщиноподібних дефектів за циклічних навантажень.

Розроблено геометрію зразків для випробувань на міцність та довговічність елементів гнучких труб в умовах статичного та циклічного згину за дії агресивних робочих середовищ, а також модифіковано та апробовано дослідне устаткування для проведення таких досліджень. Запропонована методика дає змогу досліджувати особливості початкових стадій пошкоджуваності та поверхневого тріщиноутворення, як на внутрішніх, так і на зовнішніх поверхнях елементів гнучких труб в умовах, що моделюють реальні експлуатаційні.

Одержано результати попередніх випробувань елементів гнучких труб із зовнішнім діаметром 38,10 мм і товщиною стінки 2,95 мм, які виготовлені зі сталі марки А606 з межею міцності 793 МПа та межею плинності 672 МПа. Зокрема, для внутрішньої поверхні таких труб побудовано експериментальну залежність „довжина поверхневого тріщиноподібного дефекту – кількість циклів навантаження”.

### Література

- 1 Pursell J. Coiled tubing – a manufacturer's challenges / J. Pursell // Coiled Tubing Times. – 2004. – № 3 (009). – Р. 14–16.
- 2 Механика разрушения и прочность материалов [Текст]: справ. пособ. / Под общ. ред. В.В. Панасюка. [Т. 4]: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин и др. – К: Наукова думка, 1990. – 680 с.
- 3 Молчанов А.Г. Подземный ремонт и бурение скважин с применением гибких труб / А.Г. Молчанов, С.М. Вайншток, В.И. Некрасов, В.И. Чернобровкин. – М.: Изд-во Академия горных наук, 1999. – 224 с.
- 4 Механіка руйнування та міцність матеріалів: довідн. посіб. / За заг. ред. В.В. Панасюка. [Т. 13]: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І.М. Дмитрах, Л. Тот, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк: [за ред. В.В. Панасюка]. – Львів: Сполом, 2012. – 316 с.
- 5 Stanley R.K. Some new developments applicable to coiled tubulars / R.K. Stanley // Coiled Tubing Times. – 2005. – № 3 (013). – Р. 50.
- 6 Козловский А.М. Пути повышения ресурса гибких длинномерных труб при их эксплуатации / А.М. Козловский, Г.П. Куканков, С.И. Пыхов, В.А. Шуринов, А.В. Брылкин // Время колтюбинга. – 2003. – № 3 (005). – С. 13–15.
- 7 Кристиан А. Использование трехмерных лазерных изображений для ревизии состояния гибких труб / А. Кристиан, С.М. Типтон, А.Р. Эмнетт // Время колтюбинга. – 2008. – № 2 (024). – С. 53.
- 8 Молчанов А.Г. Методика контроля состояния колонны гибких труб колтюбинговых установок в промышленных условиях / А.Г. Молчанов, В.Г. Певнев // Матер. 10-ой Междунар. конф. по колтюбинговым технологиям и внутрискважинным работам. – М., 2009. – С. 45–46.

9 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.

10 Габдулхакова О. Чему учат в університеті Талса? / О. Габдулхакова // *Время колтюбинга*. – 2009. – № 4 (029). – С. 82–85.

11 Типтон С. Две уникальные системы для проведения испытаний / С. Типтон // *Время колтюбинга*. – 2005. – № 2 (012). – С. 6.

12 Типтон С. Испытательная машина для ускоренного тестирования гибкой трубы / С. Типтон // *Матер. 10-ой Междунар. конф. по колтюбинговым технологиям и внутрискважинным работам*. – М., 2009. – С. 41.

13 Дмитрах І.М. Вплив корозійних середовищ на локальне руйнування металів біля концентраторів напружень / І.М. Дмитрах, В.В. Панасюк. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 1999. – 342 с.

14 Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст]: довідн. посіб.; за заг. ред. В.В. Панасюка. [Т. 7]: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І.М. Дмитрах, А.Б. Вайнман, М.Г. Стащук, Л. Тот; за ред. І.М. Дмитраха. – К.: ВД „Академперіодика”, 2005. – 378 с.

15 Coiled Tubing Technical Data. GT-100. Global Tubing, 2009.

16 Akid R. The effect of solution pH on the initiation and growth of short fatigue cracks / R. Akid, K. J. Miller // *Fracture behaviour and design of materials and structures: 8 th European Conf. on Fracture (ECF-8)*, 1–5 Oct., 1990: Turin (Italy): proceedings. – UK: EMAS Publishing, 1990. – P. 1403–1411.

17 Dmytrakh I.M. Determination and prediction of corrosion fatigue cracks nucleation from surface of the semicircular notches / I.M. Dmytrakh, V.V. Panasyuk // *Fracture from Defects: 12 th European Conf. on Fracture (ECF-12)*, 14–18 Sept., 1998: Sheffield (UK): proceedings. – Sheffield (UK): EMAS Publishing, 1998. – P. 1187–1192.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
31.05.17*

*Рекомендована до друку  
професором Чудик І.І.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Дмитрахом І.М.  
(Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка  
НАН України, м. Львів)*