

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДАНИЛЮК ІРИНА МИХАЙЛІВНА



УДК 539.381

**ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ ТА ДЕФОРМАЦІЙНИХ
ПАРАМЕТРІВ ЦИКЛІЧНОЇ ТРИЩИНІСТІЙКОСТІ
ЕКСПЛУАТОВАНОЇ СТАЛІ МАГІСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДУ**

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Тернопіль – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
МАРУЩАК Павло Орестович,
завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів та виробництв Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
НИКИФОРЧИН Григорій Миколайович,
завідувач відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

доктор технічних наук, професор
ШВАБ'ЮК Василь Іванович,
професор кафедри технічної механіки Луцького національного технічного університету

Захист відбудеться «__» _____ 2016 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д58.052.01 в Тернопільському національному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46008, м. Тернопіль, вул. Білогірська, 50, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського національного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розіслано «__» _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Б.Г. Шелестовський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Циклічна тріщиностійкість сталей магістральних газопроводів – одна з найважливіших механічних характеристик, які визначають їх роботоздатність. Однак тривала експлуатація трубопроводів спричиняє зміни структури і деградацію властивостей металу внаслідок впливу напружень і корозійно-наводнювальних середовищ. У металі відбуваються процеси мікродеформування, накопичення локальних мікронапружень та розвиваються дефекти, зокрема мікротріщини. Для запобігання непрогнозованого руйнування магістральних газопроводів та достовірного оцінювання їх залишкового ресурсу необхідно враховувати властивості матеріалу після тривалого напрацювання, що вимагає комплексного підходу до дослідження його фізико-механічних характеристик.

Вплив наводнювання та експлуатаційного навантаження на кінетику накопичення пошкоджень та циклічну тріщиностійкість сталей магістральних трубопроводів досліджено у працях О.Є. Андрейківа, Є.І. Крижанівського, А.Я. Красовського, Г.М. Никифорчина, Л.С. Шлапака, О.М. Карпаша, М.О. Карпаша, О.Т. Цирульника, Л.Я. Побережного, О.В. Ліванової, А.Г. Гумерова, Ю.В. Банахевича, А.Я. Середницького, І.В. Ориняка, Т.С. Єсієва, Д.Ю. Петрини та ін. Виявлено основні закономірності зародження, коалесценції та поширення втомних тріщин і розроблено методологічні підходи до оцінювання технічного стану і підвищення достовірності прогнозування залишкового ресурсу трубопроводів. Зазначені результати лише частково враховують особливості механізмів деформування матеріалу на різних масштабних рівнях. В працях Р.В. Агінея, З.Т. Галіулліна, В.В. Панасюка, С.В. Паніна, В.Р. Скальського, М.Г. Чаусова, В.В. Харионовського, В.М. Чувильдєєва досліджено основні механізми деформування матеріалів на макро- і мікрорівнях. Проте не достатньо вивчено вплив структурно-механічних дефектів на закономірності деформування та руйнування металу тривало експлуатованих труб. З іншого боку, тривала експлуатація трубних сталей зумовлює вичерпування пластичності та окрихчення матеріалів, тому використання деформаційних підходів механіки руйнування для оцінювання їх технічного стану повинно розкривати нові можливості у вивченні механізмів руйнування на стадії росту втомних тріщин.

Таким чином, актуальною задачею є поглиблене дослідження закономірностей експлуатаційної деградації сталей газопроводів з урахуванням розвитку в них пошкодженості та його впливу на деформаційні параметри поширення втомних тріщин.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати, що складають основу дисертації, отримані здобувачем як виконавцем держбюджетних тем «Діагностування та коалесценція тріщинуватих дисипативних структур на основі підходів мезомеханіки» (№ держреєстрації 0112U008076, 2013), «Розвиток наукових основ підвищення міцності і тріщиностійкості нанопокриттів з урахуванням зон локалізації деформацій» (№ держреєстрації 0114U007178, 2014), які виконувались у

Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за тематичними планами НДР Міністерства освіти і науки України впродовж 2013-2014 років. Тематика наукових досліджень відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки України.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у встановленні основних закономірностей пошкоджуваності, деформування і руйнування сталі 17Г1С у вихідному та експлуатованому станах та оцінюванні за деформаційними підходами тримкості магістральних газопроводів із тріщиноподібними дефектами.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні задачі:

– дослідити форму та мікромеханізми формування корозійних пошкоджень (пітингів) на поверхні експлуатованої труби та запропонувати автоматизований метод їх кількісного оцінювання;

– встановити основні закономірності деформування та руйнування розтягуванням сталі 17Г1С у вихідному та експлуатаційно деградованому станах;

– оцінити тріщиностійкість сталі 17Г1С труби із застосуванням оптико-цифрового аналізу зображення поверхні зразка та використанням штучних сенсорних міток, інтенсивності деформації зсуву та кута розкриття вершини тріщини;

– обґрунтувати стадійність поширення тріщини у трубній сталі 17Г1С та розробити рекомендації щодо використання деформаційних підходів для аналізу механізмів поширення втомної тріщини на мікро-, мезо- та макрорівнях.

– запропонувати інженерні методи оцінювання тріщиностійкості експлуатованої труби магістрального газопроводу, які враховують вплив розсіяних в об'ємі металу структурно-механічних пошкоджень.

Об'єкт дослідження – пошкодженість трубної сталі.

Предмет дослідження – міцність та тріщиностійкість сталі 17Г1С з урахуванням впливу експлуатаційного напруцювання.

Методи дослідження – теоретичні підходи механіки деформівного твердого тіла, сучасні експериментальні методи механіки руйнування, металографічний, фрактографічний та автоматизований цифровий аналізи пошкодженості сталі.

Наукова новизна одержаних результатів:

– досліджено форму, розміри та мікромеханізми формування корозійних пошкоджень на поверхні експлуатованої труби, що дало можливість запропонувати автоматизований метод кількісного оцінювання одиночних та об'єднаних корозійних пітингів;

– встановлено основні закономірності деформування та руйнування розтягуванням сталі 17Г1С у вихідному та експлуатаційно деградованому станах. Виявлено, що за 40 років напруцювання границя плинності сталі 17Г1С

зросла на 9%, границя міцності на 22% та відношення границі міцності до границі плинності з 1,35 до 1,56;

- вперше оцінено тріщиностійкість сталі 17Г1С труби із застосуванням оптико-цифрового аналізу зображення поверхні зразка та використанням штучних сенсорних міток, визначенням інтенсивності деформації зсуву та використанням методу кута розкриття вершини тріщини (*crack tip opening angle* – СТОА);

- розроблені рекомендації щодо використання низки деформаційних параметрів циклічної тріщиностійкості для аналізу механізмів поширення втомної тріщини у трубній сталі 17Г1С на мікро-, мезо- та макрорівнях;

- запропоновано інженерні методи оцінювання тріщиностійкості експлуатованої труби магістрального газопроводу, які дозволяють врахувати вплив розпорошених структурно-механічних пошкоджень.

Практичне значення одержаних результатів.

Визначено характеристики механічної поведінки матеріалу тривало експлуатованого магістрального газопроводу, які можуть бути використані для розрахунків міцності та тримкості конструкції нафтогазового комплексу.

Результати дисертації, в частині пропонуваного підходу оцінювання впливу розпорошеної пошкодженості на деградацію механічних властивостей ферито-перлітних сталей, використовуються при дослідженнях міцності та тріщиностійкості сталей магістральних газопроводів у філії УМГ «Прикарпаттятрансгаз», дов. №353/16-02.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить:

- розроблення методики експериментальних досліджень та оцінювання пошкодженості поверхні магістрального газопроводу із множинними корозійними дефектами;

- розроблення методик оцінювання стану поверхні з округлим дефектом, пошкодженої корозійними ураженнями із втомною тріщиною;

- виявлення основних закономірностей пошкодженості сталі 17Г1С на макро-, мезо- та мікрорівнях після тривалого напрацювання та дослідження деформування і руйнування матеріалу за статичного та циклічного навантажень;

- урахування впливу пошкодженості трубної сталі 17Г1С з множинними розпорошеними мікродефектами, на параметри міцності та тріщиностійкості матеріалу за деформаційними підходами.

Постановку задач, аналіз та трактування результатів, формулювання наукових висновків та рекомендацій проведено спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на XVI науковій конференції ТНТУ (Тернопіль, 2012); III Міжнародній науково-технічній конференції

«Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» (Тернопіль, 2012); Международных научных чтений им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, 2014); VIII Российской научно-технической конференции "Механика ресурс и диагностика материалов и конструкций" (Екатеринбург, 2014); III Всероссийской конференции "Деформирование и разрушение структурно - неоднородных сред и конструкций", посвященной 100-летию со дня рождения академика Ю.Н. Работнова (Новосибирск, 2014), 5-й Міжнародній конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій» (Львів, 2014); XII Міжнародній конференції «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» (Львів, 2014); International conference «Advances in Micromechanics of Materials» (Rzeszow, Poland, 2014).

В цілому робота доповідалась і обговорювалась на розширеному тематичному семінарі Тернопільського національного технічного університету ім. Івана Пулюя «Механіка, міцність матеріалів і конструкцій» та науковому семінарі відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 18 друкованих працях, з них 8 – статей у фахових наукових журналах і збірниках [1 – 8], 5 – статей у міжнародних журналах внесених до бази Scopus [9 – 13], 5 – праць у збірниках праць вітчизняних та міжнародних наукових конференцій [14 – 18].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 131 сторінку, в т. ч. 69 рисунків, 13 таблиць та список використаних літературних джерел із 145 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначено мету роботи та основні напрямки її досягнення, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проаналізовано механізми деформування твердих тіл на основі підходів теорії пластичності та фізики міцності матеріалів. Механічні властивості матеріалу (макрорівень) залежать від структурних факторів матеріалу: розміру зерна, субзерна, його орієнтації (мікрорівень). Лише використання багаторівневого підходу до опису процесів деформування дозволить побудувати узагальнену фізичну модель поведінки матеріалу. Потребують подальшого дослідження та узагальнення механізми впливу структури матеріалу на розпорошені пошкодження з урахуванням різних напрямків вирізання зразків, а також вплив параметрів деформації

розпушування на деформаційні залежності. Потребують поглибленого вивчення основні механізми розвитку дефектів на мікрорівні і їх вплив на макрозакономірності деформування матеріалу. Вирішення цієї проблеми можливе за умови використання деформаційного підходу механіки руйнування. На основі проведеного аналізу сформульовано мету та задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** приведено методики експериментальних досліджень, характеристики обладнання, методи і засоби реалізації силових схем та методів зчитування, накопичення та обробки даних для автоматизованого їх керування та запису. Досліджували фрагмент магістрального газопроводу «Київ – Захід України – 1» (КЗУ-1) після сорока років експлуатації в землі. Газопровід зі сталі 17Г1С, діаметром 1020 мм з товщиною стінки труби 10 мм та захищений від ґрунтової корозії гумово-бітумним ізоляційним покриттям. Пошкодження ізоляції зумовила утворення чисельних корозійних пошкоджень зовнішньої поверхні. Темплети експлуатованого газопроводу досліджували за допомогою магніто-оптичної інтроскопії в діапазоні частот від 8 до 60 кГц, при накладенні постійних однорідних магнітних полів від 0 до 25 Е для виявлення найпошкодженіших ділянок труби, з якої вирізано зразки для досліджень. Експериментальну побудову повних діаграм деформування виконано на випробувальній установці ZD-100Pu.

Кінетику накопичення розсіяних пошкоджень у експлуатованій сталі 17Г1С за статичного навантаження описували за допомогою метода *А.О. Лебедева, М.Г. Чаусова*:

$$\varepsilon_p = (1 - 2\mu(\varepsilon)) \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

де ε_p – деформація розпушення; $\mu(\varepsilon)$ – поточне значення коефіцієнта поперечної деформації.

Твердість вимірювали на приладі Супер Роквелл із навантаженням на індентор 150 Н, мікротвердість вимірювали приладом ПМТ-3 із навантаженням на індентор 1 Н з витримкою 15 сек. Структуру матеріалу ролика аналізували на металографічному мікроскопі «Axiovert 40 MAT» фірми «Carl Zeiss», Німеччина.

З метою аналізу геометричних параметрів експлуатаційних множинних та одиночних корозійних дефектів доопрацьовано пропонування *П.О. Маруцаком* та *І.В. Коноваленком, 2008* алгоритм і, ґрунтуючись на припущенні, що суміжні точки, яскравість яких належить одного діапазону, відображають об'єкт одного класу (пітінг або фон), проводили сегментацію зображення. При цьому мали два кластери пікселів, відповідних фону і розпізнаним об'єктам – пітінгів. Встановлено що одиночні пітінги розміром до 2,5 мм мали округлу форму.

З фрагменту труби електроіскровим методом вирізали плоскі зразки розміром 70 × 10 × 1 мм. Перед проведенням втомних випробувань у зразках виготовляли (висвердлювали) центральний отвір діаметром 2,4 мм. Випробування на циклічний розтяг проводили на сервогидравлічній

випробувальній машини Biss UTM 150. У процесі втомних випробувань пошкодженість поверхні оцінювали оптико-цифровим методом за параметрами деформаційного рельєфу. Стан поверхні протягом випробувань фіксували фотоапаратом Canon EOS 550D.

За аналізом цифрових зображень поверхні навантажених зразків визначали довжину тріщини та відповідні цій довжині значення СТОА.

У **третьому розділі** проаналізовано морфологію корозійних ямок, виявлених на зовнішній поверхні газопроводу після 40 років напрацювання. Темплетам, вирізаним в осьовому напрямку, притаманні яскраво виражена пошкодженість ферито-перлітної структури, часткове знеуглецювання перлітних зерен, при цьому мікрodefекти орієнтовані вздовж напрямку вальцювання у вигляді розшарувань, зумовлених наводнюванням металу.

Виявлено, що зразкам, вирізаним у повздовжньому напрямку, притаманна чітко видима площадка плинності, рис. 1а. Тривале напрацювання конструкції спричиняє накопичення пошкоджень у матеріалі конструкції та, відповідно, зміну його деформаційних властивостей, що впливає на форму кривих розтягу, рис. 1б,в. Зростає їх висота, що зумовлено вичерпуванням пластичності матеріалу та збільшується довжина, внаслідок розкриття розсіяних мікрodefектів.

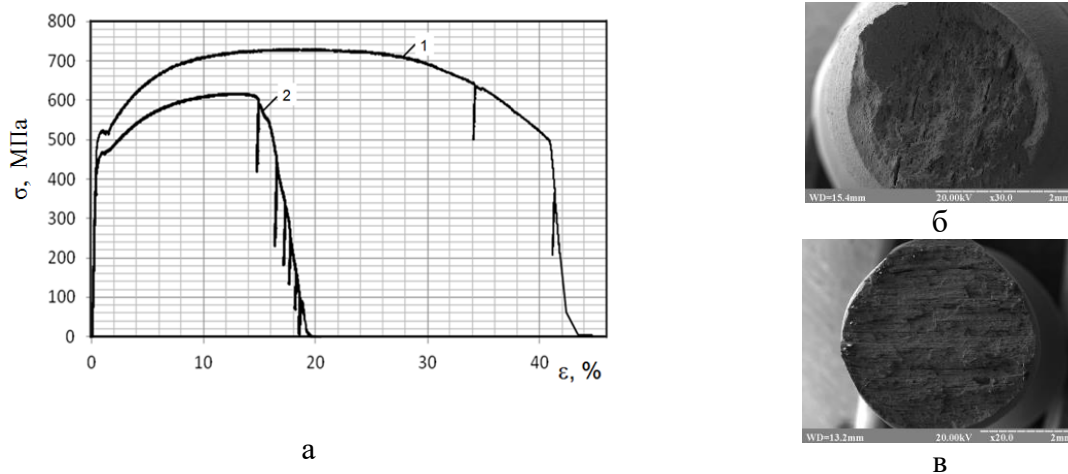


Рис. 1. Повні діаграми статичного розтягу для повздовжнього (1) та поперечного (2) напрямку вирізання зразків експлуатованої сталі 17Г1С – а та макрозлами зразків вирізаних у повздовжньому – б та поперечному – в напрямках

Аналізуючи кінетику розвитку розсіяної пошкодженості в процесі розтягування (рис. 2а), прийшли до висновку, що експлуатаційна деградація збільшила ступінь розпушення матеріалу, внаслідок чого спостерігали істотні відмінності деформаційних властивостей металу різних напрямків вирізання зразків. Помітно, що якісно кінетика процесу накопичення пошкоджень зразків за різного ступеня деформацій є подібною для невеликих деформацій, коли процеси деформування локалізовані в околі структурних утворень, зокрема відмінність деформації розпушування зразків за малих деформацій ($\epsilon = 8 \%$) становила 2 %, проте вже за деформації 20 % – 16 %.

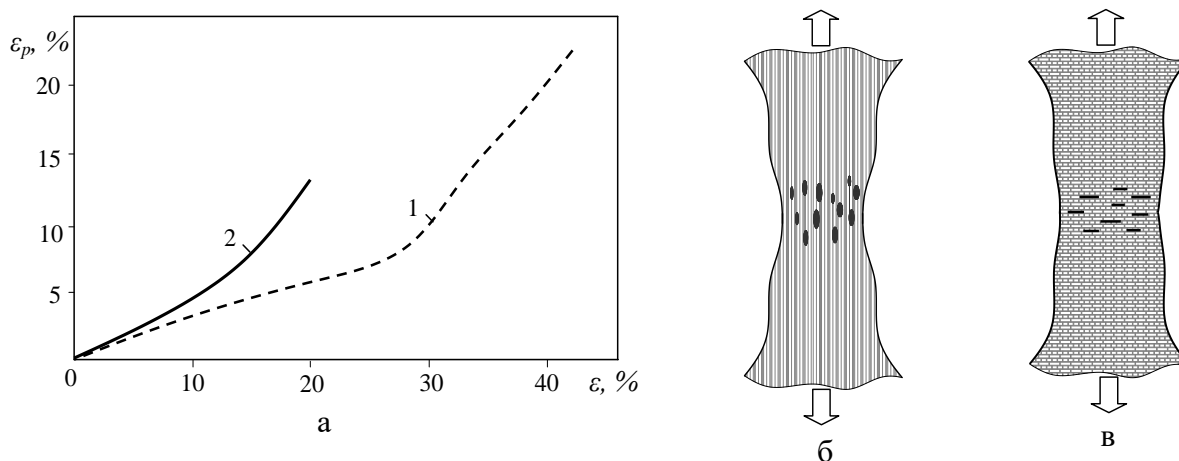


Рис. 2. Залежність деформації розпушення від залишкової деформації зразка – а та схема деформаційної поведінки зразків поздовжнього (б) та поперечного (в) напрямку вирізання з експлуатованої труби

Для зразків поздовжнього напрямку вирізання $\varepsilon_k = 42\%$, а деформація розпушення $\varepsilon_p = 27\%$. Для зразків поперечного напрямку $\varepsilon_k = 20\%$, а $\varepsilon_p = 13\%$. Значення механічних характеристик неексплуатованої та експлуатованої сталі 17Г1С подано у табл. 1. Зазначимо зростання повздовжнього видовження експлуатованої труби, що є однією з ознак накопичення розпоросених мікродефектів.

Таблиця 1

Характеристики сталі 17Г1С труби газопроводу «Київ – Захід України – 1» у вихідному стані та після 40 років експлуатації

Характеристики	Умовна межа плинності, $\sigma_{0,2}$, МПа	Умовна межа міцності, σ_B , МПа	Відносне видовження, ε , %
Нова труба (сертифікат 162/3-69)	420-435	580-590	23,5-26,0
Метал повздовжнього напрямку вирізання	460	720	44,0
Метал поперечного напрямку вирізання	520	620	20,0

Виявлено зміцнення металу труби, яке можна розглядати як прояв вичерпування її пластичності. Зокрема, у початковому стані мікротвердість сталі 17Г1С становила 1200 МПа. Для деградованої труби величина мікротвердості (H_μ) з віддаленням від внутрішньої поверхні труби монотонно зростає від 1150 МПа, з виходом на «насичення» при 1700 МПа. Це свідчить про те, що в мікрооб'ємах матеріалу відбувається закріплення дислокацій, зумовлене деформаційним впливом. Дані зміни твердості, наведені в табл. 2, теж підтверджують перебіг вказаних деградаційних процесів.

Твердість сталі 17Г1С труби газопроводу в початковому стані
і після 40 років експлуатації

Відносна товщина стінки (при аналізі від внутрішньої поверхні)	Твердість, HRB		
	$0,1h$, мм	$0,5h$, мм	h , мм
Нова труба (сертифікат 162/3-69)	79		
Експлуатована труба	89	91	88

Отримані результати дають підставу вважати, що експлуатаційна деградація металу магістрального газопроводу після тривалого напрацювання проявляється не тільки в деформаційному старінні, але й в інтенсивному розвитку пошкоджуваності (дефектності) на мікро- і субмікроуровнях. Це підтверджується зміною механічних властивостей металу в результаті тривалої експлуатації: підвищенням твердості і мікротвердості, а також підвищенням міцності, при одночасному збільшенні відносного видовження, зниженням відносного звуження, рис. 3.

Ці результати підтверджено даними магнітооптичної інтроскопії. Оскільки пошкодженість може спричиняти як збільшення, так і зменшення механічних властивостей сталі, проведено їх узагальнення у вигляді гістограми, яка дозволяє оцінити їх відхилення від початкового стану.

$$\lambda_{\varphi} = \left[(\varphi^0 - \varphi^{\text{deg}}) / \varphi^0 \right] \times 100\% , \quad (2)$$

де φ^0 , φ^{deg} – відносна зміна властивостей матеріалу на прикладі зміни відносного звуження в початковому стані і після експлуатації.

За аналізом поданої на рис. 3 гістограми можна зробити висновок, що однією з основних причин зниження деформаційних властивостей тривалоексплуатованої сталі 17Г1С є неоднорідний розподіл розсіяних пошкоджень в матеріалі, зумовлений вичерпанням пластичності стінки труби.

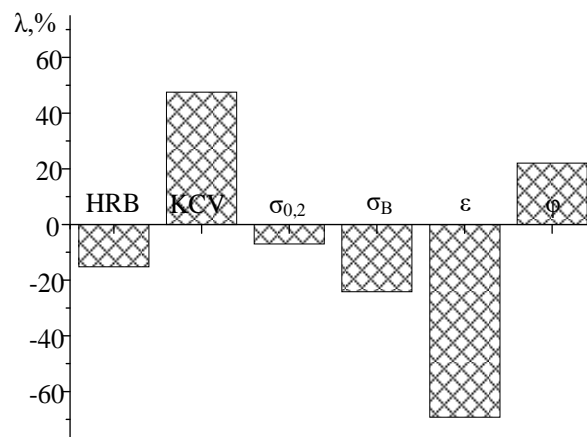


Рис. 3. Деградація механічних властивостей сталі 17Г1С після 40 років експлуатації

Враховуюче це, однією з причин ініціації руйнування магістральних газопроводів може бути локалізована нестабільність деформаційного процесу, зумовлена наявністю структурних дефектів мікро-, або мезорівня.

У четвертому розділі проведено дослідження циклічної тріщиностійкості сталі 17Г1С на зразках, вирізаних з зовнішнього та внутрішнього шарів труби з метою виявлення оптико-флюоресцентними та фрактографічними методами впливу розпорошених пошкоджень на макро- та мікромеханізми росту втомної тріщини.

Встановлено, що для довжини тріщини 0,25 мм циклічна довговічність матеріалу є подібною. Відмінності кінетики поширення виявлено для тріщини довжиною $a > 0,25$ мм, що зумовило на 20 % меншу циклічну довговічність матеріалу внутрішнього шару труби, рис. 4. Отриманий ефект можна пояснити інтенсивнішою експлуатаційною деградацією металу ближче до внутрішньої поверхні труби, через її наводнювання в результаті електрохімічної взаємодії сталі з агресивними складниками транспортованого газу. Крім того, різні відмінності в кінетиці втомного росту тріщини в експлуатованому і неексплуатованому матеріалах вказує на високу чутливість параметрів циклічної тріщиностійкості до зміни стану трубопровідних сталей.

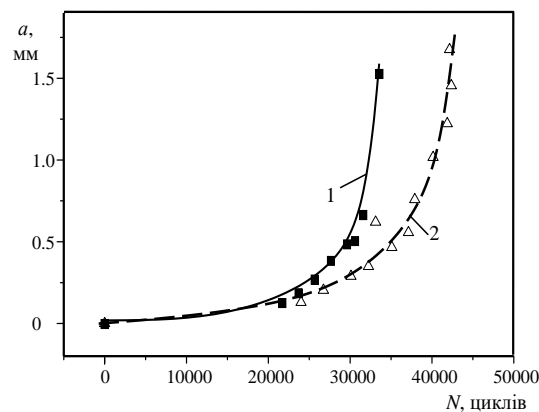


Рис. 4. Залежність довжин тріщини від циклічного напруження сталі 17Г1С зовнішнього (1) та внутрішнього (2) шарів

Закономірності самоорганізації деформаційних процесів на поверхні зразка оцінювали з використанням оптико-цифрового комплексу *TOMSC*. Побудовані карти векторів деформування матеріалу при підростання втомної тріщини.

Встановлено, що кінетика поширення втомної тріщини залежить від механізмів взаємодії вершини втомної тріщини і структури сталі 17Г1С. Вивлено, що пластичне деформування короткої тріщини ($0,1 \text{ мм} < a$), гальмувалось, внаслідок гілкування її вершини у «компонентній структурі» трубної сталі. Підростання тріщини ($0,1 \text{ мм} < a < 0,5 \text{ мм}$) зумовило ріст локальних пластичних деформацій, що перекривають значну кількість «смуг» феррито-перлитної структури. За таких умов в матеріалі виникають розшарування на межах феррито-перлитної структури, зумовлені неоднорідністю їх пластичного течіння.

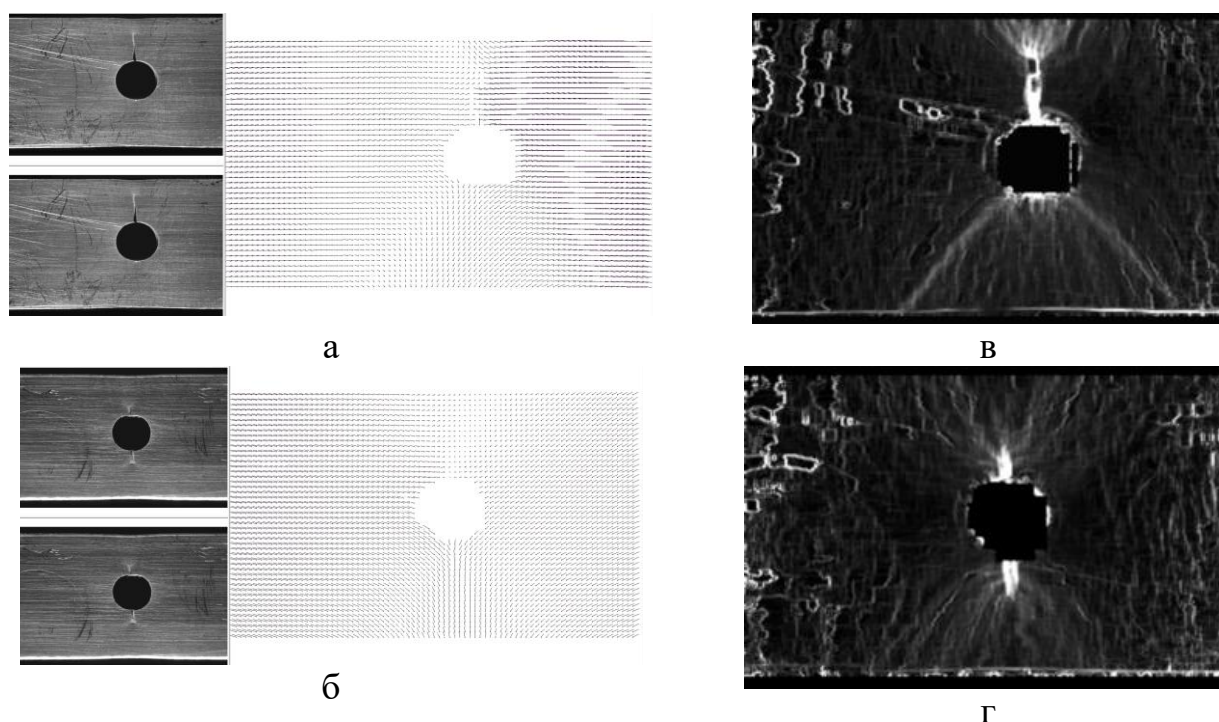


Рис. 5. Поля зсувів і розподіл пластичної деформації однобічної – а, в та двобічної – б, г втомних тріщин

Для «довгих» тріщин ($a > 0,5$ мм), рис. 5б конфігурація зон локалізації деформації «двохпелюсткової» форми зберігалась до руйнування. Ці дані стали підґрунтям створення методу цінювання деформаційних процесів у вершині втомної тріщини за зміщенням смуг-маркерів.

Таким чином, можна виділити кілька основних стадій втомного руйнування, пов'язаних зі зміною геометрії пластичної зони, табл. 3.

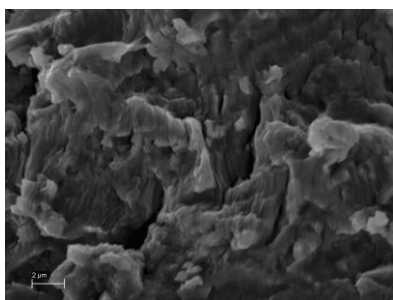
Таблиця 3

Стадійність руйнування сталі 17Г1С для різних шарів вирізки з магістральної труби

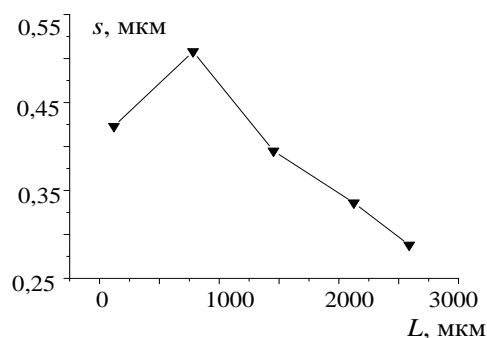
Стадійність	Шар вирізання зразків	
	Внутрішня поверхня	Зовнішня поверхня
1	2	3
Стадія 1	Активний опір зовнішньому силовому впливу спричиняє лише локальна зона у вершині тріщини, спостерігали прудшення деформацій у об'ємі матеріалу на мікрорівні, а поширення втомної тріщини відбувалось за схемою» зсув + поворот».	Однобічне підростання втомної тріщини із активним накопиченням пошкоджень на поверхні отвору-концентратора з протилежного напрямку поширення втомної тріщини боку. Спостерігали деформування та зростання шорсткості поверхні біля контуру, де у подальшому зароджується мікротріщина.

1	2	3
Стадія 2	«Пелюстки» розташовані з внутрішніх боків отвору змінюють свою форму. Якщо у вершині втомної тріщини пластична зона має чітку форму, то з протилежного боку отвору, вона є розмитою. Це свідчить, про те, що у смугах локалізованої деформації зберігається максимальна величина інтенсивності деформації зсуву, що визначає траєкторію та механізми поширення втомної тріщини.	З боку макротріщини виникає пластична зона без видимих смуг деформацій. Підростає мікротріщина з іншого боку отвору, що й визначає зміну напружено-деформованого стану зразка. При подальшому циклічному навантаженні спостерігали розширення ділянки пластичного деформування, зростанням кількості смуг та їх розмірів.
Стадія 3	Чіткість форми пластичної зони у вершині тріщини є більш виразною, з протилежного боку помітно смуги локалізованої пластичності.	Формування виразних пластичних зон у формі «вусів» у кожній з вершин втомних тріщин.

Макрозлам матеріалу зовнішнього шару труби мав квазікрихкий, нерегулярний макробороздчатий рельєф, що нагадує лускатий, рис. 6а. Це підтверджує, те, що в момент зародження тріщини виникали дві системи ковзання в вершині тріщини, а старт і підростання тріщини відбулося за схемою «зсув + поворот», рис. 6.



а



б

Рис. 6. Мікрофрактограма – а і крок втомних борозенок (мікрошвидкість поширення втомної тріщини) – б вздовж фронту тріщини у сталі 17Г1С вирізаної з зовнішньої поверхні труби

На мікрорівні у локальних ділянках зразка спостерігали типові втомні борозенки. Із зростанням швидкості поширення втомної тріщини відбувався

перехід від лускатого рельєфу, до змішаного крихко-пластичного із мікророзшаруваннями поверхні, рис. 6а.

Макрозлам сталі 17Г1С *внутрішнього шару* труби також мав квазікрихкий вигляд, на мікрорівні тріщина поширювалась з формуванням втомних борозенок, а зі збільшенням довжини тріщини за змішаним вязко-крихким механізмом, рис. 7в.

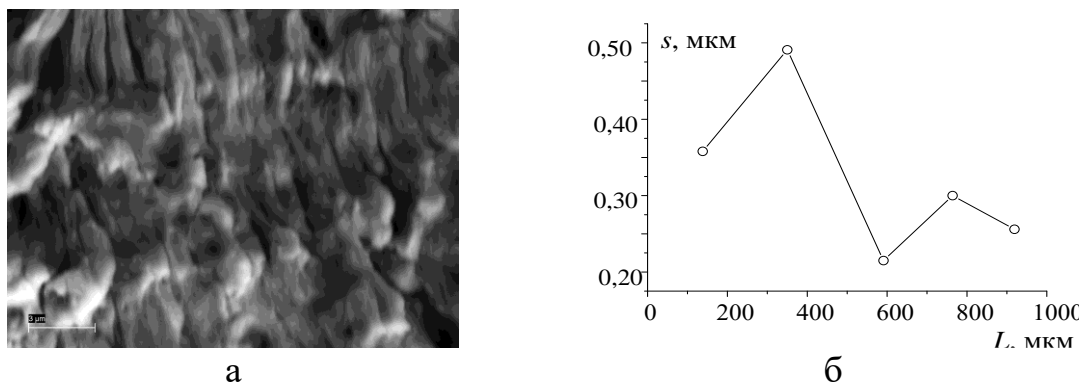


Рис. 7. Мікрофрактограма (а) і крок борозенок (б) вздовж фронту втомної тріщини у сталі 17Г1С вирізаної з внутрішньої поверхні труби

Встановлено, що швидкість росту втомної тріщини, визначена за кроком втомних борозенок (мікрорівень) відрізняється від визначеної експериментально кінетики поширення втомної тріщини (макрорівень), швидкість якої зі збільшенням довжини зростає. Отже, в даному випадку втомні борозенки не можуть використовуватись для кількісного оцінювання тріщиностійкості експлуатованої сталі 17Г1С. Такі відмінності у механізмах росту втомної тріщини зумовлені тим, що крім втомних механізмів мали місце й інші, переважно в'язкі механізми руйнування в околі розсіяних пошкоджень.

У **п'ятому розділі** обґрунтовано можливість математичного опису взаємозв'язку між деформаційними процесами на поверхні зразка, в околі вершини тріщини та руйнуванням експлуатованої сталі 17Г1С. Впорядковане рельєфоутворення в околі досліджуваного концентратора є неоднорідним і складним процесом, якому властиві самовпорядкованість і значні групові та індивідуальні варіації. Математичний опис дає змогу адекватно кількісно його оцінити, і розробити достовірні методи визначення інваріантних інформаційних ознак. Вони описуються кількома принципами:

- певне співвідношення параметрів зовнішнього навантажування (напруження, гранична деформація тощо) визначає макроскопічну втрату стійкості внаслідок течіння матеріалу в околі вершини тріщини;
- кожному етапу деформування властиві пластичні зсувні та ротаційні зміщення;
- параметри полів деформацій дозволяють описати масштабно-інваріантні закономірності самоорганізації деформаційного процесу.

Вхідними даними для математичного оброблення є оптично-цифрове зображення впорядкованого рельєфу поверхні, рис. 8. На поверхню механічним способом наносили сенсорні мітки, перпендикулярно до напрямку поширення втомної тріщини. При цьому, враховували, що деформаційні дефекти на поверхні циклічно деформованого матеріалу є зсувного, або ротаційного походження. Це дозволило припустити, що циклічне напрацювання буде змінювати нахил сенсорних міток, або спотворювати їх геометрію.

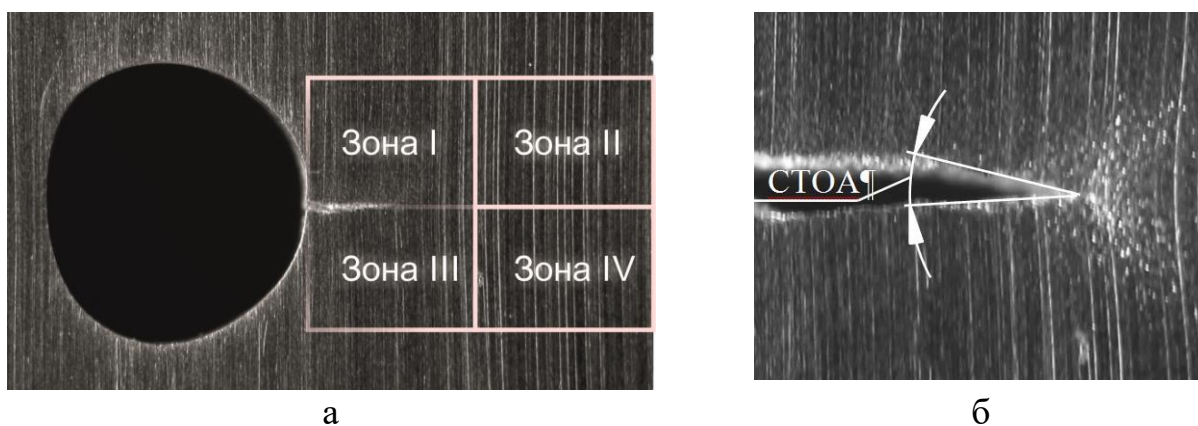


Рис. 8. Ділянки зразка зі штучними поверхневими мітками – а; та вимірювання СТОА – б

Подібні ознаки спостерігали на поверхні алюмінієвих сенсорів під час оцінювання пошкодженості авіаконструкцій (Карускевич М.В. та ін., 2013). Поверхню зразка в околі концентратора умовно поділили на чотири інформативні ділянки. Аналізували зміну орієнтації міток протягом циклічного напрацювання. Додатково, кінетику руйнування матеріалу оцінювали за значенням кута розкриття вершини тріщини (СТОА), який є одним з деформаційних параметрів механіки руйнування, рис. 8б.

Кожну зону (рис. 9а) аналізували у п'яти точках оптико-цифрового контролю. Алгоритм аналізу зображення полягає у застосуванні операції інвертування, бінарного перетворення та визначення переважаючого кута нахилу виявлених прямолінійних міток за допомогою перетворення Хафа.

СТОА дозволив описати циклічну тріщиностійкість матеріалу за циклічного навантаження, для аналізованого випадку таку залежність подано на рис 9. Він (СТОА), на відміну від інших параметрів лінійної та нелінійної механіки руйнування може бути визначений на підставі «чистого» вимірювання, без додаткових перерахунків. Основним при цьому є механізм шарнірного обертання макрофрагментів зразка відносно вершини тріщини, який зумовлює мінімальне тунелювання і забезпечує точність вимірювання кута розкриття тріщини для «тонких» зразків. Передбачалося, що ψ_c є константою матеріалу, хоча, як виявилось, він залежить від довжини тріщини, рис. 8.

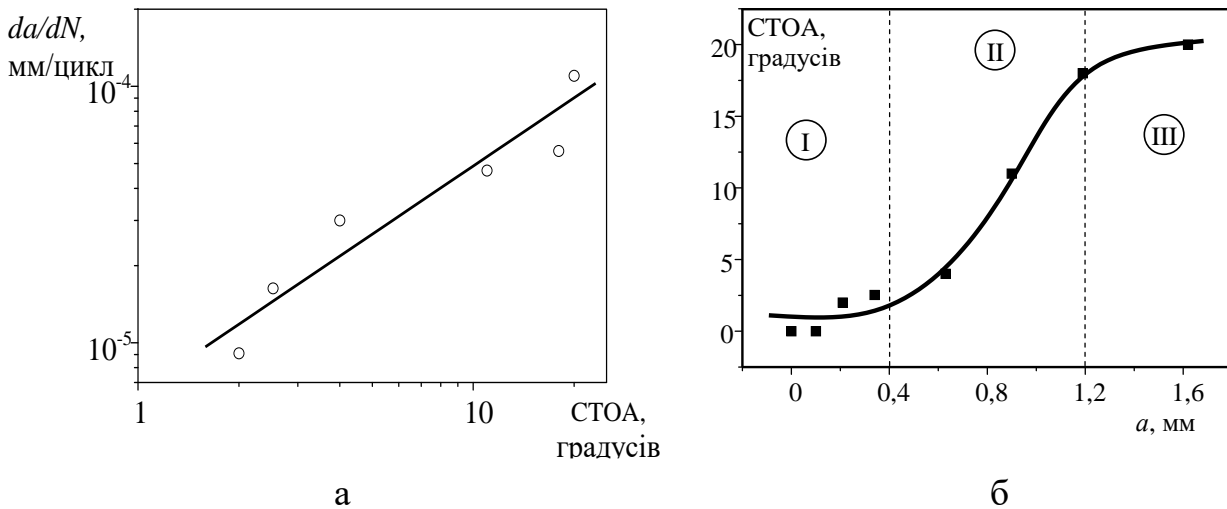


Рис. 9. Залежність швидкості росту тріщини a від СТОА – а та вплив довжини тріщини на зміну СТОА – б

Проаналізовано кути розкриття тріщини залежно від її довжини (рис. 8б). Для «фізично короткої тріщини» кут розкриття становив 2° . Граничне значення кута відповідає значному підростанню тріщини, яке передуює долому зразка (СТОА $> 20^\circ$). Закономірності зміни СТОА від довжини тріщини можна поділити на три ділянки, рис. 8, які пов'язані з різними масштабними рівнями деформування.

Мікрорівень. На ділянці (I) СТОА мав невисоке значення, оскільки робочий переїз зразка мав ще достатній запас стримувальної здатності і матеріал активно опирався деформуванню і руйнуванню. Подальша зміна кута нахилу залежності $a - \text{СТОА}$ відображає не лише вплив початкової дефектності на поверхні зразка, але і зниження його стійкості до зсуву під час навантажування. Незалежно від виду мікронапруженого стану в околі вершини тріщини взаємопов'язаність деформаційних процесів в суміжних ділянках поширюється на більший структурно-масштабний рівень. Локалізація деформації в навантаженому зразку відображена перегином кривої.

Мезорівень. Ділянка графіка (II) характеризується максимальним зростанням СТОА та чергуванням процесів деформування і руйнування матеріалу. Спостерігали перерозподіл розкриття тріщин і розвитку релаксаційних процесів у металі. Аналіз залежності на рис. 8б показує, що структурна адаптація матеріалу відбувся внаслідок зсуву прилеглих ділянок металу в околі вершини тріщини.

Макрорівень. Ділянка (III) описує деформування матеріалу до точки втрати зсувної макростійкості. При цьому, зсувні деформації спричиняють релаксацію концентраторів напружень у вершині втомної тріщини. Це пов'язане із вичерпуванням запасу пластичності матеріалу. Проаналізовано три характерні масштабні рівні деформування та руйнування матеріалів. Встановлено можливості використання різних показників для оцінювання деградації матеріалу магістрального газогону. Стан експлуатованого матеріалу слід оцінювати з використанням комплексу показників деградації матеріалу, які дають змогу виявити її на мікро-, мезо- та макрорівнях.

Параметри оцінювання деградації сталі

Параметри оцінювання	Структурні рівні деградації матеріалу		
	мікро-	мезо-	макро-
Кут орієнтації поверхневого рельєфу	+	+	+
Площа макродефекту	–	+	+
Еквівалентний діаметр макродефекту	–	+	+
Кут розкриття вершини тріщини	–	–	+

Використання сукупності пропонованих підходів оптично-цифрового контролю, для оцінювання тріщиностійкості матеріалів магістральних газопроводів, має низку переваг. Вони дозволяють отримувати інформацію, представлену у вигляді розподілу деформаційних зсувів, проводити експеримент безконтактно із мінімальною підготовкою поверхні. Важливим аспектом є урахування даних механічних випробувань для оцінювання тріщиностійкості експлуатованої труби. Розглянемо схему руйнування ділянки магістрального газопроводу, рис. 10.

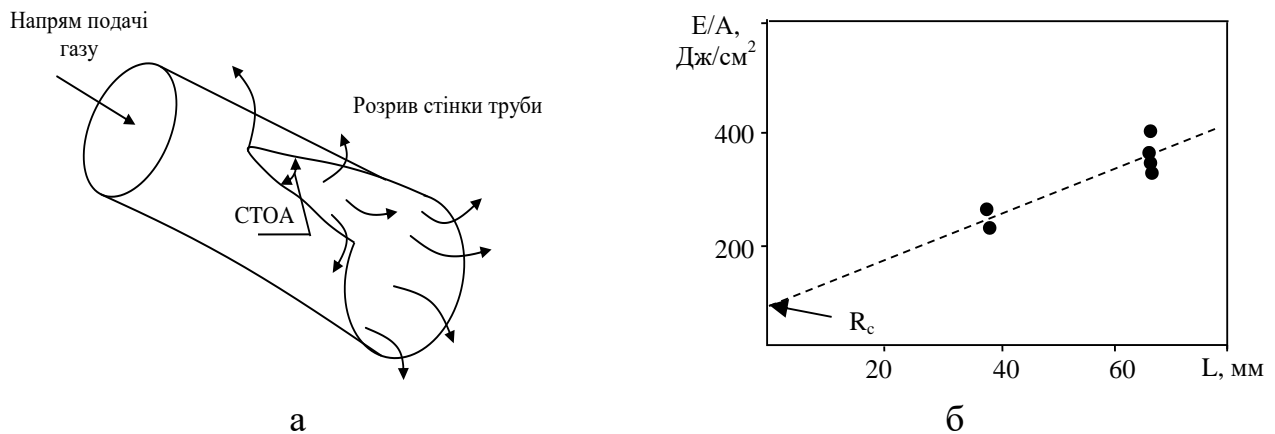


Рис. 10. Схема руйнування ділянки магістрального газопроводу (O'Donoghue, et al, 2007) – а та енерговитрати на руйнування сталі X65 (Yang X.B., Zhuang Z., et al, 2008) – б

Критичне значення (СТОА) обчислено за рівнянням O'Donoghue et al:

$$(СТОА)_c = \frac{180}{\pi} 2571 \frac{S_c}{\sigma_{od}},$$

де S_c - енергія пластичного деформування матеріалу вздовж поверхні руйнування; σ_{od} - параметр стійкості матеріалу до динамічного впливу;

$$\sigma_{od} = 0,65(\sigma_{0,2} + \sigma_B),$$

Результати обчислень параметрів тріщиностійкості

Стан труби	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	S_c (Дж/мм)	СТОА _c , °
Нова	430	580	37000	11
Експлуатована	460	720	23000	6

Таким чином параметр тріщиностійкості СТОА може бути використаний для оцінювання стану матеріалу як у вихідному та й в експлуатованому стані оскільки є достатньо чутливим до деградаційних змін у матеріалі.

ВИСНОВКИ

У дисертації запропоновано теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі, що полягає в оцінюванні закономірностей пошкоджуваності, деформування і руйнування сталі 17Г1С у вихідному та деградованому у експлуатаційних умовах станах та оцінюванню тримкості магістральних газопроводів із тріщиноподібними дефектами.

1. Розроблено та вдосконалено методики автоматизованого дослідження процесів деформування та оцінювання розпорошеної пошкодженості теплостійких сталей, що дозволило підвищити достовірність одержаних експериментальних результатів та оцінити пошкодженість матеріалу на мікро-, мезо-, і макрорівнях.

2. Поглиблено вивчено поверхню магістрального газопроводу, експлуатаційно пошкоджену множинними корозійними пітингами, що дозволило уточнити геометрію відокремлених та об'єднаних корозійних ямок, гістограми їх розподілу. Виявлення цих закономірностей дозволило обґрунтувати межі застосування автоматизованого методу аналізу цифрового зображення для корошованої поверхні магістрального газопроводу.

3. Розроблено метод оцінювання пошкоджуваності поверхні, який ґрунтується на оптико-цифровому аналізі локальних ділянок матеріалу в околі вершини втомної тріщини та метод оцінювання впливу пластичної деформації на локалізовані дефекти матеріалу, що дозволяють оцінити поточне пошкодження матеріалу під час циклічного деформування розтягом.

4. Виявлено основні закономірності впливу тривалого напрацювання на деформування і руйнування сталі 17Г1С за методом повних діаграм. Напрацювання збільшує умовну межу плинності і відношення $\sigma_B/\sigma_{0,2}$ сталі 17Г1С, збільшує відносне видовження, в основному за рахунок збільшення складової рівномірної деформації, порівняно із вихідним станом.

5. Обґрунтовано характеристики механічних властивостей, найбільш чутливі до експлуатаційної деградації матеріалу в умовах тривалого напрацювання, що супроводжується інтенсивною пошкодженістю. Протилежний характер зміни відносного видовження і відносного звуження, що свідчить про інтенсивну розпорошену пошкодженість експлуатованого металу. Зниження відносного звуження вказує на експлуатаційне окрихчення металу, в тому числі внаслідок деформаційного зміцнення, показником якого може слугувати збільшення твердості і мікротвердості. В той же час підвищення

відносного видовження пов'язане з розкриттям множинних дефектів, тобто не відображає здатності металу до пластичного деформування.

б. Запропоновано та обґрунтовано можливість використання деформаційного (СТОА) підходів до оцінювання циклічної та динамічної тріщиностійкості матеріалів експлуатованих магістральних газопроводів, які дозволяють врахувати вплив пошкодження на параметри механіки руйнування. Метод за відповідного забезпечення портативними оптико-цифровими засобами має перспективи використання на експлуатованих об'єктах в польових умовах для діагностування стану труби з наявними втомними тріщинами.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. *Контроль рассеянной поврежденности* стали магістрального газопровода методом магнитооптической вихретоковой интроскопии / В. Бержанский, П. Марущак, Р. Бищак, И. Данилюк, В. Вишневский, А. Прокопов, Ф. Панков, Н. Луговской // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту. – 2013. – № 3. – С. 272 – 278.

2. *Вплив мікроорганізмів на корозію* підземних металокопструкцій / М. Полутренко, Є. Крижанівський, Л. Побережний, П. Марущак, Б. Бусько, І. Данилюк // Вісник Тернопільського нац. техн. ун-ту. – 2014. – № 2. – С. 48 – 54.

3. *Аналіз дефектності поверхні* тривало експлуатованих магістральних нафтогазопроводів / П.О. Марущак, Л.С. Шлапак, Р.Т. Біщак, І.М. Данилюк // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – Спец. вип. № 10. – С. 579 – 583.

4. *Оцінювання кінетики утомного руйнування* шляхом автоматизованого аналізу деформаційного рельєфу на поверхні зразків з центральним отвором / П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, С.В. Панин, П.С. Любутін, І.М. Данилюк, М.А. Журавков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – 50. – № 3. – С. 69 – 76.

5. *Коноваленко И.В., Марущак П.О., Данилюк И.М.* Фрактографический и дефектометрический анализ параметров множественных коррозионных питтингов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2014. – № 7. – С. 32 – 36.

6. *Циклическое нагружение* стали 17Г1С. Ч. 1. Структурные уровни деформации и разрушения / П.О. Марущак, С.В. Панин, И.В. Власов, И.М. Данилюк, Б.Б. Овечкин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. Т. 57. – № 9-3. – С. 165 – 169.

7. *Циклическое нагружение* стали 17Г1С. Ч. 2. Механизмы разрушения / П.О. Марущак, С.В. Панин, И.В. Власов, И.М. Данилюк, Б.Б. Овечкин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 9-3. – С. 170 – 174.

8. *Ударная вязкость* стали магістрального газопровода после длительной эксплуатации / П.О. Марущак, И.М. Данилюк, Т. Вухерер, Р.Т. Бищак // Металлург. – 2015. – № 4. – С. 48 – 52.

9. *Low temperature impact toughness of the main gas pipeline steel after long-term degradation* / P.O. Maruschak I.M. Danyliuk, R.T. Bishchak, T. Vuherer // Central European Journal of Engineering. – 2014. – Vol. 4 (4). – P. 408 – 415.

10. *Structural levels of the nucleation and growth of fatigue crack in 17Mn1Si steel pipeline after long-term service* / P. Maruschak, S. Panin, I. Vlasov, O. Prentkovskis, I. Danyliuk // *Transport*. – 2015. – Vol. 30. – Issue 1. – P. 15 – 23.

11. *Fractographic regularities in fatigue failure of 17Mn1Si steel* / P. Maruschak, S.V. Panin, I. Vlasov, I. Danyliuk, R. Bishchak // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 1040. – P. 230 – 235.

12. *Degradation of the main gas pipeline material and mechanisms of its fracture* / P. Maruschak, I. Danyliuk, O. Prentkovskis, R. Bishchak, A. Pylypenko, A. Sorochak // *Journal of Civil Engineering and Management*. – 2014. – Vol. 20. – Issue 6. – P. 864 – 872.

13. *Influence of preliminary deformation on micromechanisms of failure of offshore gas pipeline material* / P. Maruschak, I. Danyliuk, L. Poberezhnyi, T. Pyrig, S. Panin // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 770. – P. 304 – 309.

14. *Аналіз розпорошених та локалізованих мікродеформаційних утворень* / П.О. Марущак, І.В. Коноваленко, І.М. Данилюк, У.В. Сало // *Збірник тез XVI наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, Том II. «Матеріалознавство та машинобудування» (5-6 грудня), Тернопіль, ТНТУ. – 2012. – С. 90.*

15. *Марущак П.О., Данилюк И.М. Закономерности деформирования стали магистральных газопроводов после длительной эксплуатационной деградации* // *Труды Международных научных чтений им. чл.-корр. РАН И.А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов»*, (4-5 сентября), М: ИММ им. А.А. Байкова РАН, 2014. – С. 195 – 196.

16. *Исследование ударной вязкости стали магистрального газопровода после длительной эксплуатационной наработки* / И.М. Данилюк, П.О. Марущак, С.В. Панин, И.В. Власов // *Тезисы VIII Российской научно-технической конференции «Механика ресурс и диагностика материалов и конструкций» (26 – 30 мая), Екатеринбург, Институт машиноведения УО РАН, 2014. – С. 52.*

17. *Аналіз механізмів руйнування матеріалу труб морських газопроводів* / Л. Побережний, П. Марущак, Т. Пиріг, В. Негрич // *Праці 5-ї Міжнародної конференції «Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій» (24 – 27 червня), Львів, ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2014. – С. 689 – 694.*

18. *Structural levels of fatigue failue and damage estimation in 17Mn1Si steel on the basis of multilevel approach of physical mesomechanics* / P. Maruschak, S. Panin, F. Stachowicz, I. Danyliuk, I. Vlasov, R. Bishchak // *Proceeding of Int. Conf. «Advances in Micromechanics of Materials» (8 – 11 July), Rzeszow, Poland, 2014. – P. 40 – 42.*

АНОТАЦІЯ

Данилюк І.М. Оцінювання пошкодженості та деформаційних параметрів циклічної тріщиностійкості експлуатованої сталі магістрального газопроводу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2015.

Дисертацію присвячено дослідженню основних закономірностей пошкоджуваності, деформування і руйнування сталі 17Г1С у вихідному та

деградованому станах та оцінюванні тримкості магістральних газопроводів із тріщиноподібними дефектами за деформаційними підходами. Встановлено основні закономірності впливу тривалого експлуатаційного напрацювання на пошкодженість, руйнування сталі 17Г1С та запропоновано схеми деформування матеріалу на різних структурних рівнях. Виявлено та систематизовано макро- та мікромеханізми статичного деформування та руйнування сталі 17Г1С після тривалої експлуатації. Виявлено, що тривале напрацювання збільшує умовну межу текучості сталі 17Г1С на 9 %, умовну межу міцності на 22 % та відношення границі плинності до границі міцності з 1,35 до 1,56, проте значно знижуються ударна в'язкість та відносне звуження зразків, що свідчить про окрихчення металу труби. Запропоновано підход до оцінювання циклічної тріщиностійкості тривало експлуатованої сталі, що дозволили ввести стадійність поширення тріщини та запропонувати рекомендації щодо використання деформаційного критерію механіки руйнування (СТОА). Розвинуто інженерні методи оцінювання тріщиностійкості експлуатованої труби магістрального газопроводу із урахуванням експлуатаційних пошкоджень матеріалу.

Ключові слова: пластична деформація, міцність, пластичність, мікромеханізми руйнування, магістральний газопровід.

АННОТАЦИЯ

Данилюк И.М. Оценка поврежденности и деформационных параметров циклической трещиностойкости стали магистрального газопровода после эксплуатации. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.- Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, г. Тернополь, 2015.

Диссертация посвящена исследованию основных закономерностей повреждаемости, деформирования и разрушения стали 17Г1С в исходном и деградированном состояниях и оценке несущей способности магистральных газопроводов с трещиноподобными дефектами с использованием деформационного подхода.

Установлены и систематизированы основные закономерности образования коррозионных питтингов и развиты подходы их автоматизированного анализа на оптических изображениях и снимках, полученных методом сканирующей электронной микроскопии. Рассмотрены особенности их статистического анализа, проведен анализ их форм.

Установлены основные закономерности влияния длительной эксплуатационной наработки на повреждаемость, разрушение стали 17Г1С и предложены схемы деформирования материала на различных структурных уровнях.

Выявлены и систематизированы макро- и микромеханизм статического и циклического деформирования и разрушения стали 17Г1С после длительной эксплуатации. Установлено, что длительная наработка увеличивает условный предел текучести стали 17Г1С на 9%, условный предел прочности на 22% и отношение предела прочности к пределу текучести с 1,35 до 1,56,

одновременно снижается ударная вязкость и относительное сужение образцов, что свидетельствует об охрупчивании металла трубы. Предложенные подходы к оценке циклической трещиностойкости стали после длительной эксплуатации, позволили ввести стадийность распространения трещины и предложить рекомендации по использованию деформационного критерия механики разрушения (СТОА). Развита инженерные методы оценки трещиностойкости эксплуатируемой трубы магистрального газопроводов с учетом эксплуатационных повреждений материала.

Ключевые слова: пластическая деформация, прочность, пластичность, микромеханизм разрушения, магистральный газопровод.

ANNOTATION

Danyliuk I.M. Damage assessment and deformation parameters of cyclic crack resistance of operated steel of gas pipeline. – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of technical sciences in specialty 01.02.04 – Mechanics of deformable solids. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2015.

Dissertation is dedicated to the investigation of damageability, deformation and fracture of steel 17G1S in the initial and degraded condition and the evaluation of load-bearing capacity of gas mains with crack-like defects using deformation approach. The main regularities are found in the influence of a long-term operation on damageability and destruction of steel 17G1S, and schemes of material deformation at different structural levels are proposed. Macro- and micromechanisms of static and cyclic deformation and fracture of steel 17G1S after a long-term operation are found and systematized. It is established that the long-term operation increases the conventional yield strength of steel 17G1S by 9%, the ultimate strength by 22%, and the ratio of the ultimate strength to the yield strength from 1.35 to 1.56. In addition, it decreases fracture toughness and relative narrowing of specimens, indicating the embrittlement of the pipe metal. The proposed approach to the evaluation of cyclic fracture toughness of steel after a long-term operation allowed suggesting a stage-like nature of the crack propagation, and proposing recommendations on using deformation criterion of fracture mechanics. Engineering methods for evaluating fracture toughness of gas mains in operation are developed, taking into account the in-service damage of materials.

Keywords: plastic deformation, strength, ductility, the microscopic mechanism of destruction, the main gas pipeline.