

622.692.4
1741

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАФТИ І ГАЗУ



Побережний Любомир Ярославович

УДК 621.643

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ І РУЙНУВАННЯ МОРСЬКИХ
ТРУБОПРОВІДІВ ПРИ СТАТИЧНОМУ ТА НИЗЬКОЧАСТОТНОМУ
НАВАНТАЖЕННІ**

05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу МОН України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Крижанівський Євстахій Іванович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, ректор

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Грудз Володимир Ярославович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтоосховищ



кандидат технічних наук
Говдяк Роман Михайлович,
голова правління ВАТ „Укргазпроект”

Провідна установа: ІВП „Всеукраїнський науковий і проектний інститут транспорту газу” (ВНПІТРАНСТАЗ), м. Київ

Захист відбудеться **„11” грудня 2002 р. о 14 год.** на засіданні спеціалізованої вченої ради Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, вул. Карпа

З дисертації вченої ради Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпа

Автореферат

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради канд. техн.

Корнута



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В процесі тривалої експлуатації морських трубопроводів (30 років і більше), що проходить у постійній взаємодії з морським середовищем, відбувається закономірна зміна напружено-деформованого стану несучих елементів при найрізноманітніших комбінаціях статичних та динамічних силових факторів і впливів.

Особливої актуальності набувають дослідження низькочастотної мало- та багатоциклової втоми і корозійної втоми, а також статичні випробовування з урахуванням фактору часу, в яких використовуються експериментальні зразки-моделі, виготовлені із заготовок, вирізаних зі стінки труби. Реалізація таких досліджень, а особливо довготривалих випробовувань, необхідних для правильного визначення ресурсу роботи трубопроводу, вимагає створення нових методологічних підходів до постановки та проведення експерименту, коректного визначення постійних та запи-су змінних в часі параметрів, а також представлення інформації у зручному для обробки та подальших інженерних розрахунків вигляді.

Зв'язок з науковими програмами. Представлена дисертаційна робота виконана в рамках Державної програми „Освоєння ресурсів газу і нафти шельфу Чорно-го та Азовського морів” на 2000-2005 рр.

Мета та задачі дослідження. Створення розширеної інженерної методики та встановлення закономірностей деформації і руйнування матеріалу морських трубо-проводів при статичному та низькочастотному навантаженні з урахуванням впливів структури, масштабного фактору, концентрації напружень, частоти навантаження, асиметрії циклу напружень, агресивності середовища, а також комбінації цих впли-вів з метою підвищення їх конструкційної міцності, надійності в експлуатації та до-вговічності.

Досягнення мети вимагає розв'язання таких задач:

1. Розробка конструкцій та типової технології виготовлення експериментальних зразків-моделей і створення автоматизованої випробовувальної системи з ЕОМ для комплексних досліджень в кінетиці деформації, руйнування, електродного потенціалу (ЕП) матеріалу трубопроводу в робочих середовищах, а також скано-ваних поверхонь зламів, забезпечуючи імітацію умов навантаження елемента трубопроводу.
2. Дослідження деформації матеріалу різних ділянок трубопроводу в статистиці з ура-хуванням фактору часу та визначення стандартних і нестандартних фізико-механічних характеристик з метою прогнозування деформівної та несучої здат-ності елемента або конструкції трубопроводу в цілому.
3. Розкриття кінетичних особливостей деформації і руйнування матеріалу трубо-проводу при низькочастотному мало- та багатоцикловому навантаженні у повітрі в залежності від структури та концентрації напружень.
4. Виявлення загальних закономірностей впливу морської води та одночасного впливу корозійного середовища і концентрації напружень або частоти наванта-ження на циклічну міцність і довговічність матеріалу трубопроводу, а також па-

ралеельне дослідження кінетики деформації та ЕП основного металу та зварного з'єднання труб.

5. Розробка способів прискореної оцінки границі витривалості та корозійної витривалості матеріалу трубопроводу при низькочастотному навантаженні, виходячи з отриманих експериментальних результатів та їх графічної і аналітичної інтерпретації.
6. Прогнозування втомної та корозійно-втомної міцності елемента трубопроводу при асиметричних циклах за діаграмами граничних напружень.

Об'єкт дослідження – малоциклова та багатоциклова низькочастотна втома і корозійна втома.

Предмет дослідження. Кінетика деформації, руйнування та електродного потенціалу матеріалу морських трубопроводів при статичному і низькочастотному навантаженні у робочих середовищах.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводили на основі сучасних методів механіки руйнування, механіки корозійного руйнування, корозійної електрохімії напружено-деформованого металу, трибофатики. Експериментальні дослідження виконували з використанням методів тензометрії та потенціометрії за розробленою методикою на базі створеної автоматизованої випробувальної системи з ЕОМ, що дозволяє отримати високу точність та достовірність результатів експерименту і якісно відстежити кінетику деформації та ЕП, а також макробудову поверхонь руйнування.

Наукова новизна одержаних результатів. Введено комплексне поняття про малоциклову та багатоциклову низькочастотну втому і корозійну втому морських трубопроводів, спираючись на всебічний аналіз умов їх експлуатації та деформаційно-кінетичне трактування процесу. Вперше, на гладких зразках-моделях в області низькочастотної (0,8 Гц) малоциклової втоми, виявлено аномальну деформаційну поведінку текстурованої сталі 20 та зварного з'єднання, яка проявляється у виникненні деформаційних піків, зумовлених послідовним проходженням інтенсивних швидкоплинних процесів циклічного зменшення та зміцнення, а також інверсію втомної довговічності зварного з'єднання, яка пов'язана з ефектами циклічного деформування, розкритими за допомогою кінетичних кривих деформації та діаграм циклічного кругового згину. Зареєстровано аномальну деформаційну поведінку текстурованої сталі 20 у морській воді, яка відрізняється від подібної поведінки сталі у повітрі інтенсивнішим процесом циклічного зменшення на I стадії та менш інтенсивним процесом повторного зменшення на III стадії. З метою подальшого розвитку теорії низькочастотної корозійної втоми, вперше кінетичні криві деформації та ЕП представлено в об'єднаному вигляді, а їх аналіз виконується комплексно з графічною інтерпретацією макробудови сканованого зламу та розгортки робочої поверхні зруйнованого зразка. Введено поняття про кінетичний цикл росту втомної (корозійно-втомної) тріщини і показано, що його тривалість при низькочастотному навантаженні є важливою характеристикою, чутливою до величини амплітуди напружень σ_a та впливу середовища.

Практичне значення отриманих результатів. Створено автоматизовану

випробовувальну систему з ЕОМ для комплексних досліджень в кінетиці деформації, руйнування, ЕП матеріалу трубопроводу при статичному та низькочастотному навантаженні в робочих середовищах, використовуючи розроблені конструкції зразків-моделей, виготовлених зі стінки труби. Запропоновано та визначено у статисти нестандартні характеристики пружності, пластичності, деформаційного зміцнення, повзучості для пояснення поведінки сталі в конструкції трубопроводу та уточнення розрахунків. Побудовано придатні для інженерних розрахунків повні криві низькочастотної втоми для сталі трубопроводу з різною структурою та зварного з'єднання за результатами випробовувань зразків-моделей з конструктивними концентраторами і без. Показано можливість оцінки впливу середовища на величину руйнівних циклічних напружень за площею долому зразка-моделі. В умовах низькочастотного навантаження підтверджено локалізацію корозійних процесів в зоні зварного з'єднання біля границі розділу фаз „основний метал – зварний шов”.

Розроблено:

- оригінальне програмне забезпечення для запису вимірюваних величин у файл, побудови графіків в режимі реального часу, автоматичного регулювання частоти вимірів з метою якісного відстеження швидкоплинних процесів;
- спосіб оперативної діагностики зламів матеріалів;
- спосіб визначення при ступінчастому навантаженні чистим згином умовної границі текучості $\sigma_{0,2}^*$;
- спосіб визначення величини критичного розкриття надрізу $\delta_{кр}^n$;
- способи прискореної оцінки границі витривалості основного металу та зварного з'єднання труб: за діаграмами статичного і циклічного кругового згину; за результатами випробовувань зразків-моделей з підібраними геометричними параметрами надрізу;
- способи прискореної оцінки корозійної витривалості матеріалу трубопроводу за прогнозованими ділянками кривих низькочастотної корозійної втоми;
- спосіб спрощеної побудови діаграм граничних напружень циклу за результатами випробовувань в статисти та при низькочастотному навантаженні;
- новий методичний підхід до оцінки пластичності та визначення граничної залишкової деформації $\Delta \epsilon_{гр}$, при якій експлуатація зварного з'єднання може вважатися ще безпечною;
- методику визначення деформаційних областей низькочастотної втоми.

Розширену інженерну методику дослідження деформації та руйнування морських трубопроводів передано ДАТ „Чорноморнафтогаз” для використання у виробництві. **Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи отримані автором самостійно. Роботи [5, 12, 14] опубліковані без співавторів. В роботах [1, 7, 8, 15] автору належить розробка конструктивної схеми та програмного забезпечення і оптимізація режимів роботи. В роботі [13] – ідея винаходу та розробка алгоритмів

комп'ютерної обробки цифрових відбитків. В роботах [6, 9] автором запропоновано методику дослідження матеріалу трубопроводу у корозійних середовищах. В роботах [2, 3, 10, 11] – постановка експерименту та інтерпретація одержаних результатів. У роботі [16] автором побудовано діаграми Сміта, а в роботі [4] – зведені діаграми згину у схематизованому вигляді.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися на Міжнародній науково-технічній конференції „Проблеми створення нових машин і технологій” (м. Кременчук, 2001), I Всеукраїнській науково-технічній конференції аспірантів та студентів „Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих” (м. Донецьк, 2001), Міжнародній науково-технічній конференції „Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації” (м. Кременчук, 2002), II Міжнародній науково-технічній конференції „Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих” (м. Донецьк, 2002), VI Міжнародній конференції-виставі „Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів” (м. Львів, 2002), IV Міжнародному симпозиумі з трибофатики ISTF – 2002 (м. Тернопіль, 2002), а також на науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу ІФНТУНГ у 2001-2002 рр.

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, з них 9 у фахових журналах України, 2 – Російської Федерації, 1 деклараційний патент України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури (185 найменувань) та 3 додатків. Викладена на 199 сторінках машинописного тексту, містить 91 рисунок та 7 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету і задачі дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну цінність роботи.

У першому розділі аналізуються перспективи та тенденції розвитку морського трубопроводного транспорту, пояснюється специфіка взаємодії морського середовища з трубопроводом в процесі експлуатації, зумовлена варіаціями навантажень і впливів на несучі елементи. Показано, що в розрахунках конструкцій трубопроводів за границею пружності першорядне значення мають діаграми „напруження – деформація” для трубних сталей, отримані експериментальним шляхом. Пружно-пластична деформація розглядається як один із найбільших резервів повнішого використання несучої здатності морського трубопроводу.

Усебічно розглянуто умови експлуатації, коли елементи конструкції морського трубопроводу зазнають малоциклової та багатоциклової низькочастотної втоми і корозійної втоми. Показано, що в практиці дослідження та інженерних розрахунків перспективно використовувати повні криві низькочастотної втоми та діаграми граничних напружень циклу для матеріалу трубопроводу.

У відповідності з метою сформульовано задачі дослідження.

У другому розділі описано об'єкти і методи досліджень. Експериментальні

зразки-моделі виготовляли із заготовок, вирізаних зі стінки труби (сталь 20), за розробленою нами типовою технологією. Випробовували також зварні з'єднання труб, виконані ручним зварюванням електродами марки УОНИ-13/55. Для комплексного дослідження в кінетиці деформації, руйнування та ЕП матеріалу трубопроводу створено автоматизовану випробувальну систему з ЕОМ. Статичне навантаження здійснювали чистим згином, а циклічне – при додатковому обертанні зразка із заданою частотою. Створено розширену інженерну методичку дослідження корозійно-механічного руйнування матеріалу трубопроводу, в якій вперше результати випробувань при статичному та низькочастотному навантаженні у морській воді представлено об'єднано, у вигляді кінетичних кривих деформації та ЕП (рис. 1), а їх аналіз виконується комплексно з графічною інтерпретацією макробудови сканованого зламу та розгортки робочої поверхні зруйнованого зразка.

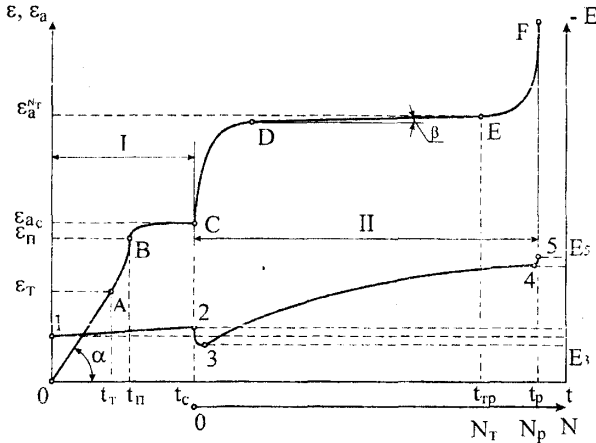


Рис. 1. Кінетичні криві деформації та ЕП сталі трубопроводу при статичному (I) та низькочастотному (II) навантаженні у морській воді: ϵ_T – відносна деформація, яка відповідає умовній границі текучості $\sigma_{0,2}$; ϵ_n – деформація початку логарифмічної повзучості; ϵ_{ac} – стартова амплітуда деформації; $\epsilon_a^{N_T}$, N_T – амплітуда деформації початку прискороного росту корозійно-втомних тріщин та відповідна кількість циклів; t_T , t_n , t_c , t_{TP} – відповідно час досягнення деформації ϵ_T , ϵ_n , ϵ_{ac} , $\epsilon_a^{N_T}$; t_p , N_p – час та кількість циклів до руйнування.

Узагальнена кінетична крива деформації складається з таких характерних ділянок: OA – пружної деформації; AB – деформаційного зміцнення; BC – повзучості; CD – циклічного зменшення; DE – стабілізації, або сповільненого зростання амплітуди пластичної деформації $\Delta\epsilon^u$; EF – прискороного росту корозійно-втомних макротріщин, формування магістральної тріщини та спонтанного руйнування зразка. Розміри ділянок OA, AB та BC залежать від фізико-механічних властивостей матеріалу та режимів випробувань. При максимальному напруженні в статистиці

$\sigma_{\max} \leq \sigma_{0,2}^*$ ділянки АВ та ВС зникають.

Узагальнена кінетична крива ЕП в області статичного навантаження представлена ділянкою 1-2, а в області циклічного навантаження – ділянками 2-3, 3-4 та 4-5. На ділянці 1-2 відбувається монотонне падіння ЕП, зумовлене адсорбцією на поверхні зразка агресивних йонів, виникненням пар Еванса тощо. Початковій стадії циклічного зменшення відповідає стрімкий зсув ЕП в позитивну сторону (діл. 2-3). Ділянка 3-4 відображає характер зміни ЕП до моменту утворення сформованої магістральної тріщини. На ділянці 4-5 відбувається швидке падіння ЕП внаслідок поширення магістральної тріщини, новоутворені береги якої являють собою активну область, не охоплену раніше корозією.

При побудові кінетичних кривих слід звернути увагу на вибір масштабу по координатних осях. На рис. 1 деформації при статичному та низькочастотному навантаженні представлені в різних масштабах.

В третьому розділі експериментально підтверджено можливість прогнозування деформаційної поведінки елемента трубопроводу за даними статичних та повторно-статичних випробовувань зразків-моделей методом ступінчастого навантаження з характерними витримками в часі (рис. 2).

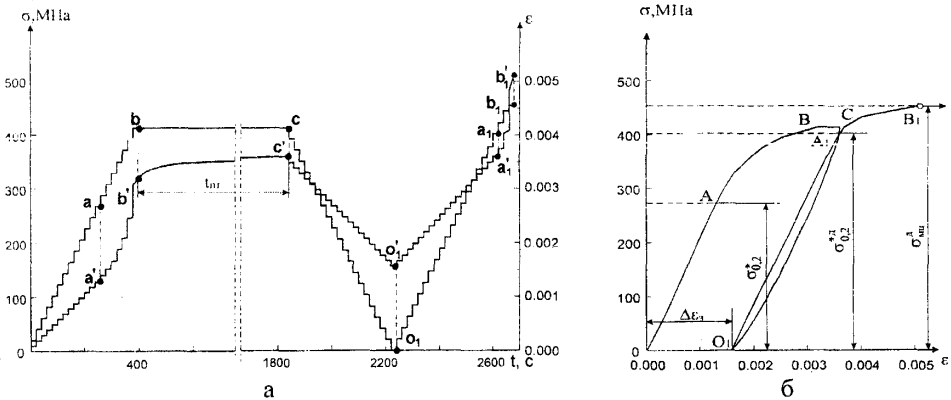


Рис. 2. Графіки зміни напружень і деформацій в часі (а) та діаграма згину (б) для зразків-моделей із текстурованої сталі 20: $t_{\text{пр}}$ – час витримки при логарифмічній повзучості, $\Delta\epsilon_z$ – залишкова деформація.

При збільшенні чи зменшенні навантаження на один стулїнь номінальні напруження σ змінювалися на 20 МПа. При такому режимі відстежували ділянки пружної деформації (ОА, оа'), деформаційного зміцнення (АВ, а'б'), повзучості (ВС, б'с'), розвантаження (СО₁, с'о₁'), повторного навантаження (О₁А₁В₁, о₁'а₁'б₁') та визначали границю текучості при першому ($\sigma_{0,2}^*$) та повторному ($\sigma_{0,2}^{*A}$) згині, а також границю міцності при повторному згині $\sigma_{\text{т}}^A$.

Діаграми згину показали, що сталь 20 не має чітко вираженої границі текучос-

ті. Тому у таких випадках при випробуваннях на розтяг визначають умовну границю текучості $\sigma_{0,2}$, яка відповідає $\Delta \varepsilon_3 = 0,2\%$. Однак, після навантаження довгих зразків-моделей чистим згином до області відчутної повзучості (рис. 2, діл. ВС) та наступного розвантаження (діл. CO_1), $\Delta \varepsilon_3 = 0,12\%$, що вказує на неприйнятність традиційного способу визначення такої важливої характеристики механічних властивостей матеріалу трубопроводу. Пропонується спосіб визначення умовної границі текучості при ступінчастому навантаженні чистим згином, який полягає в тому, що спочатку за експериментальними точками будують діаграму згину. Потім визначають кут нахилу ділянки OA : $\alpha = \text{arctg } E$, де E – модуль Юнга матеріалу. Далі, з точки O проводять пряму під кутом $\alpha_1 = \text{arctg } E_1$. Величину E_1 задаємо, а саме $\frac{E - E_1}{E} \cdot 100\% = 0,2\%$. Тоді пластична деформація $\Delta \varepsilon_{пл} = \varepsilon_T \cdot 0,002$, де ε_T – відносна деформація, що відповідає умовній границі текучості при чистому згині $\sigma_{0,2}^*$. Параметри $\Delta \varepsilon_{пл}$, $\sigma_{0,2}^*$ та E взаємозв'язані: $\Delta \varepsilon_{пл} = \frac{0,002 \cdot \sigma_{0,2}^*}{0,998E}$. Умовний модуль пружності повторно деформованої сталі E_d визначали як тангенс кута нахилу прямої, що з'єднує точки O_1 та A_1 петлі гістерезису.

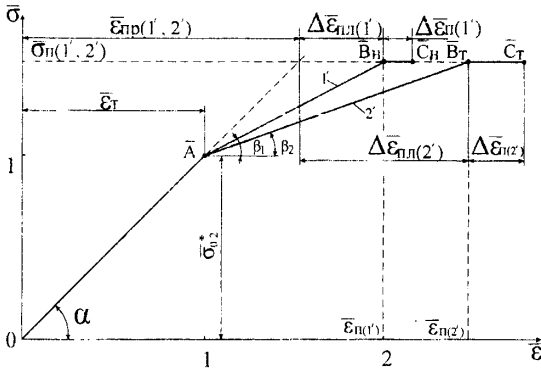


Рис. 3. Зведені діаграми згину для нетекстурованої (1') та текстурованої (2') сталі 20 у схематизованому вигляді: $\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_T}$,

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}^*}$$

Для сталей трубопроводів з різними фізико-механічними властивостями та структурою пропонується використовувати схематизовані зведені діаграми згину, які для нашого випадку представлені ламаними $O\bar{A}\bar{B}_n\bar{C}_T$ та $O\bar{A}\bar{B}_T\bar{C}_T$ (рис. 3). При такій графічній інтерпретації ділянка $O\bar{A}$, яка відповідає пружній деформації, для текстурованої та нетекстурованої сталі є спільною, і її довжина дорівнює $\sqrt{2}$. Рівняння прямої $O\bar{A}$ буде $\bar{\varepsilon} = \bar{k}_1 \cdot \bar{\sigma}$ при $\bar{\sigma} \leq 1$, де $\bar{k}_1 = 1$ – схематизований коефіцієнт пружної деформації. Відповідно схематизований модуль пружності $\bar{E} = \frac{1}{\bar{k}_1} = 1$, $\text{tg } \alpha = \bar{E} = 1$ і $\alpha = 45^\circ$. Вважаємо, що пластична деформація починається в точці \bar{A} при $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{0,2}^* = 1$ та $\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_T = 1$. Тоді рівняння прямих $\bar{A}\bar{B}_n$ та $\bar{A}\bar{B}_T$ можна представити

ти загальною формулою $\bar{\varepsilon} = 1 + \bar{k}_2(\bar{\sigma} - 1)$ при $1 \leq \bar{\sigma} \leq \bar{\sigma}_n$, де \bar{k}_2 - схематизований коефіцієнт пластичної деформації, $\bar{\sigma}_n$ - схематизоване номінальне напруження, при якому має місце логарифмічна повзучість (горизонтальні ділянки $\bar{V}_n \bar{C}_n$ та $\bar{V}_T \bar{C}_T$).

Відповідно схематизований модуль пластичності $\bar{E}_n = \frac{1}{k_2}$. Даний параметр характеризує опірність сталі пластичній деформації. В загальному випадку

$$\bar{E}_n = \operatorname{tg} \beta = \frac{\bar{\sigma}_n - \bar{\sigma}_{0,2}^*}{\bar{\varepsilon}_n - \bar{\varepsilon}_r}, \text{ де } \bar{\varepsilon}_n = \bar{\varepsilon}_{np} + \Delta \bar{\varepsilon}_{nn}. \text{ Враховуючи, що } \bar{\sigma}_{0,2}^* = 1, \bar{\varepsilon}_r = 1 \text{ та } \bar{\varepsilon}_{np} = \bar{\sigma}_n$$

отримаємо $\bar{E}_n = \frac{1}{1 + \frac{\Delta \bar{\varepsilon}_{nn}}{\bar{\sigma}_n - 1}}$. Отже, для оцінки пластичності можна використовувати

параметри $\Delta \bar{\varepsilon}_{nn}$ та $\Delta \bar{E}_n$, за якими текстурована сталь 20 виглядає пластичнішою у порівнянні з нетекстурованою. Оцінку деформаційного зміцнення доцільно проводити за параметрами \bar{E}_n та $\frac{\beta}{\alpha}$, які вказують на те, що більше зміцнюється, тобто чинить більший опір пластичним деформаціям, нетекстурована сталь 20.

В результаті випробовувань зразків зварного з'єднання труб та виходячи з теорії приросту деформації запропоновано новий методичний підхід до оцінки пластичності та граничної залишкової деформації $\Delta \varepsilon_{cr}$, при якій експлуатація зварного з'єднання може вважатися ще безпечною, заснований на побудові кривих $\sigma - \Delta \varepsilon$. Дано всебічний аналіз діаграм згину зразків-моделей з кільцевим надрізом з початковим радіусом $r_0 = 0,75$ мм, побудованих в координатах $\sigma -$ розкриття надрізу δ^H та розроблено спосіб визначення величини критичного розкриття надрізу $\delta_{кр}^H$, що відповідає границі міцності повторно-деформованих зразків з надрізом σ_{mi}^{kl} . Виявлено, що пластичний матеріал трубопроводу – сталь 20 при σ_{mi}^{kl} доводиться до руйнування з утворенням зламу з характерними регулярно розташованими боріздрками, витягнутими вздовж фронту поширення тріщини.

В четвертому розділі представлено повні криві втоми (рис. 4, а) для нетекстурованої (1) та текстурованої (2) сталі трубопроводу, що складаються з 4 характерних ділянок: АВ ($A_1 B_1$) – циклічної повзучості; ВС ($B_1 C_1$) і DE ($D_1 E_1$) – відповідно мало- та багатоциклової низькочастотної втоми; EF ($E_1 F_1$) – фізичної границі витривалості. Розкрито кінетичні особливості деформації та руйнування сталі трубопроводу на цих ділянках і показано істотний вплив структури на закономірності прояву деформаційних стадій. Для пояснення розривів між ділянками ВС ($B_1 C_1$) і DE ($D_1 E_1$) та прискореної оцінки границі витривалості сталі σ_1 за циклічною границею текучості $\sigma_{0,2}^{*u}$ побудовано діаграми (рис. 4, б) статичного (1, 3) та циклічного кругового (2, 4, 4') згину.

Вперше, в області низькочастотної малоциклової втоми виявлено аномальну деформаційну поведінку текстурованої сталі 20 та зварного з'єднання, яка проявля-

ється у виникненні деформаційних піків, зумовлених послідовним проходженням інтенсивних швидкоплинних процесів циклічного зменшення та зміцнення (рис. 5); а також інверсію втомної довговічності зварного з'єднання, що пов'язана з ефектами циклічного деформування, розкритими за допомогою кінетичних кривих деформації та діаграм циклічного кругового згину.

Визначено деформаційні області низькочастотної втоми, а саме: спонтанної деформації, яку може спричинити навіть 1/4 циклу навантаження при $\sigma_a = \sigma_{m\alpha}^u$; прогнозованої деформації, в межах якої знаходиться область зміни механізму деформації, безпечної деформації, що лежить нижче ϵ_T^u – амплітуди деформації при $\sigma_{0,2}^u$ (рис. 6). Представлені криві дозволяють якісно та кількісно оцінити здатність сталі трубопроводу з різною структурою витримувати циклічні деформації в часі, тобто проявляти втому довговічність.

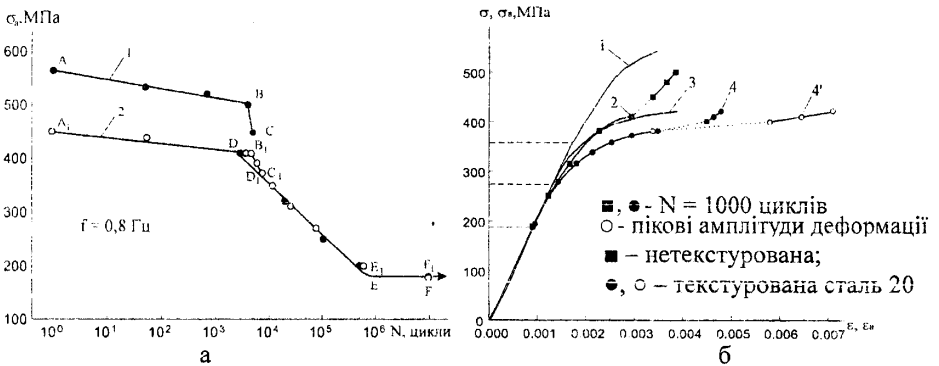


Рис. 4. Повні криві низькочастотної втоми (а) та діаграми згину (б)

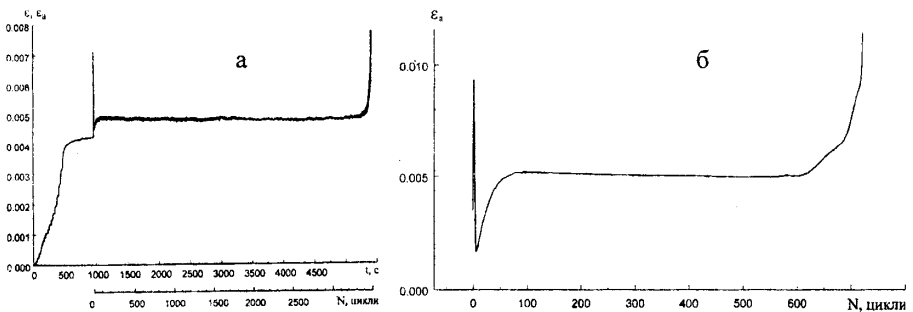


Рис. 5. Кінетичні криві деформації текстурованої сталі 20 при 420 МПа (а) та зварного з'єднання при 490 МПа (б)

Побудовано повну криву низькочастотної втоми зразків-моделей з кільцевим надрізом ($r_0 = 0,75$ мм) і показано, що вихід зразків з надрізом на фізичну границю витривалості $\sigma_{-1k} = 90$ МПа відбувається при значно меншій абсцисі перегину

($N_{ii} \approx 10^5$ циклів), ніж у гладких зразків з $N_n \approx 7 \cdot 10^5$ циклів та $\sigma_{-1} = 180$ МПа. Запропоновано спосіб прискореної оцінки σ_{-1} гладких зразків за результатами випробовувань зразків-моделей з підібраними параметрами надрізу. На основі аналізу кінетичних кривих $\delta^H - N$ та макроструктури втомних зламів розкрито специфіку деформації і руйнування трубної сталі в зоні концентратора напружень.

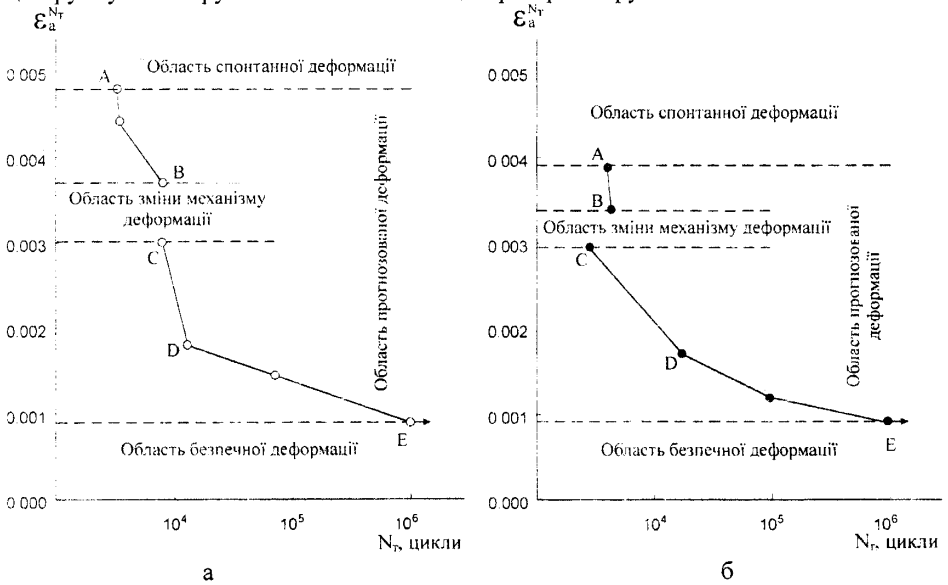


Рис. 6. Деформаційні області низькочастотної втоми для нетекстурованої (а) та текстурованої (б) сталі трубопроводу

П'ятий розділ присвячено низькочастотній корозійній втомі матеріалу морських трубопроводів. В діапазоні $\sigma_a = 60 \dots 280$ МПа збільшення частоти навантаження від 0,8 до 50 Гц спричинює зростання довговічності сталі трубопроводу у морській воді в 5...6,7 разів, що доводить неможливість заміни низькочастотних корозійно-втомних випробовувань поширеними випробовуваннями з частотою 50 Гц. Запропоновано способи прискореної оцінки корозійної витривалості основного металу та зварного з'єднання труб за прогнозованими ділянками кривих низькочастотної корозійної втоми, побудованими з використанням однієї або двох експериментальних точок.

Вперше, в області низькочастотного малоциклового навантаження, виявлено аномальну деформаційну поведінку текстурованої сталі 20 у морській воді, яка відрізняється від подібної поведінки сталі у повітрі інтенсивнішим процесом циклічного знеміцнення на I стадії та менш інтенсивним процесом повторного знеміцнення на III стадії. Показано можливість оцінки впливу середовища на величину руйнівних циклічних напружень за площею долому зразка-моделі. Встановлено, що непружність у морській воді спостерігається і при $\sigma_a < \sigma_{0,2}^*$, оскільки при низькочастотному

навантаженні на базі 10^6 циклів метал труби отримує додатковий приріст $\Delta \epsilon^H$ від адсорбційно-електрохімічної дії середовища. У високоамплітудній області втомного зламу корозійна витривалість зварного з'єднання може перевищувати його витривалість у повітрі, що не пов'язано з охолоджуючою дією морської води, а має деформаційно-кінетичне пояснення. За кінетичними кривими $\delta^H - N$ виявлено складний характер впливу корозійного середовища на розвиток процесів деформації і руйнування (рис. 7) в зоні концентратора напружень, особливо при $\sigma_a < \sigma_{\text{пл}}^k$ (границя пропорційності при $r_0 = 0.75$ мм), в результаті якого біля вершини кільцевого надрізу формується сітка одиничних корозійно-втомних тріщин, вершини яких, внаслідок електрохімічного розчинення, притуплюються, що, в цілому, призводить до перетину кривих втоми та корозійної втоми і утворення області, в якій корозійна витривалість зразків з надрізом підвищується, порівняно з повітрям, у 2 і більше разів.

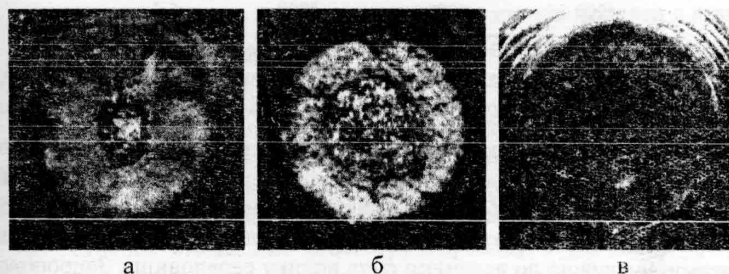


Рис. 7. Злами зразків-моделей з кільцевим надрізом у морській воді: 185 (а), 535 (б) та 700 МПа (в)

Досліджено стадійність кінетики ЕП основного металу та зварного з'єднання труб при статичному та низькочастотному навантаженні у морській воді. Показано, що збільшення σ_a прискорює розблагородження матеріалу до потенціалу долому, величина якого від σ_a залежить слабо. Підтверджено локалізацію корозійних процесів в зоні зварного з'єднання біля границі розділу фаз „основний метал – ЗШП”. На рис. 8 представлено кінетичні криві $\epsilon (\epsilon_a) - t (N)$ та $- E - t (N)$ в об'єднаному вигляді. Відзначено відсутність кореляції між ЕП та пружно-пластичними деформаціями.

Швидкоплинні процеси на початкових стадіях корозійної втоми добре простежуються за кінетичними кривими деформації, а процес накопичення та розвитку пошкоджень, коли відбувається стабілізація деформації або незначна її зміна, краще інтерпретувати за кінетичними кривими ЕП. Встановлено, що потенціал долому зразків-моделей з кільцевим надрізом зі сталі 20 знаходиться в широкому діапазоні (-585...- 650 мВ) і при зменшенні σ_a спадає, в залежності від кінетики росту тріщини, береги якої мають значно нижчий ЕП, ніж бічні поверхні надрізу; ЕП поверхні руйнування може становити - 900... - 950 мВ, що вказує на високу хімічну активність металу у вершині тріщини та значний вплив корозійних процесів на її розвиток.

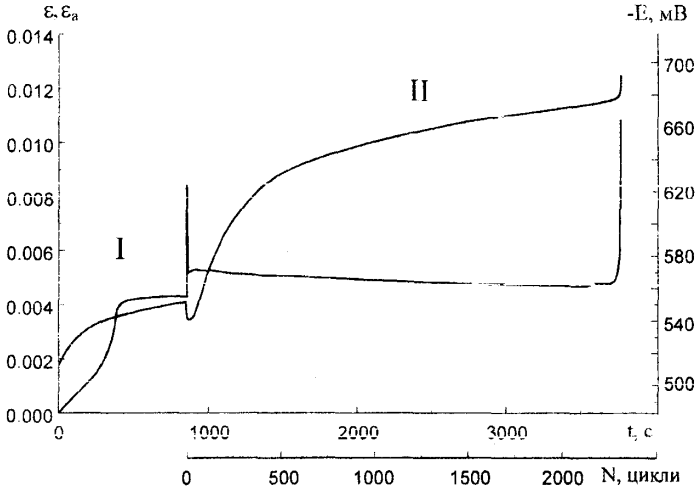


Рис. 8. Кінетичні криві деформації та ЕП текстурованої сталі трубопроводу при статичному (I) та низькочастотному (II) навантаженні у морській воді (420 МПа)

Вперше введено поняття про кінетичний цикл росту втомної (корозійно-втомної) тріщини, який, незалежно від σ_a , може відбуватися за схемою: прискорений ріст – рівномірний ріст зі швидкістю V_1 – гальмування – рівномірний ріст зі швидкістю V_2 . Показано, що тривалість кінетичного циклу є важливою характеристикою низькочастотної втоми, чутливою до величини σ_a та впливу середовища. Запропоновано для практичної реалізації спосіб спрощеної побудови діаграм граничних напружень циклу.

ВИСНОВКИ

1. Створено та експериментально перевірено ефективність розширеної інженерної методики дослідження деформації і руйнування матеріалу морських трубопроводів при статичному та низькочастотному навантаженні з урахуванням впливів структури, масштабного фактору, концентрації напружень, частоти навантаження, асиметрії циклу напружень, агресивності середовища, а також комбінації цих впливів. Розроблено конструкції, типову технологію виготовлення експериментальних зразків-моделей, автоматизовану випробувальну систему з ЕОМ та оригінальне програмне забезпечення для комплексних досліджень в кінетиці деформації, руйнування, електродного потенціалу матеріалу трубопроводу в робочих (технологічних) середовищах, а також сканованих поверхонь зламів, забезпечуючи імітацію умов навантаження елемента трубопроводу.
2. Розроблено: спосіб оперативної діагностики зламів матеріалів, який полягає в тому, що сканують поверхню руйнування, опрацьовують одержаний цифро-

- вий відбиток в графічному редакторі і, використовуючи комп'ютерну базу даних, роблять висновки про характер та причини руйнування; спосіб визначення при ступінчастому навантаженні чистим згином умовної границі текучості $\sigma_{0,2}^*$ – напруження, при якому пластична деформація $\Delta \epsilon_{пл} = \epsilon_T \cdot 0,002$, що пов'язується з реальними умовами навантаження морських трубопроводів.
3. Запропоновано використовувати зведені діаграми згину у схематизованому вигляді для визначення нестандартних характеристик пружності, пластичності, деформаційного зміцнення, повзучості та пояснення поведінки сталі в конструкції трубопроводу і уточнення розрахунків.
 4. Виходячи з теорії приросту деформації, запропоновано новий методичний підхід до оцінки пластичності та визначення граничної залишкової деформації $\Delta \epsilon_{гр}$, при якій експлуатація зварного з'єднання може вважатися ще безпечною, заснований на побудові кривих „номінальне напруження σ – залишкова деформація $\Delta \epsilon_3$ ”.
 5. Дано всебічний аналіз діаграм згину зразків-моделей з кільцевим надрізом та розроблено спосіб визначення величини критичного розкриття надрізу $\delta_{кр}^n$, що відповідає границі міцності повторно-деформованих зразків з надрізом $\sigma_{мц}^{кл}$.
 6. Введено комплексне поняття про малоциклову та багатоциклову низькочастотну втому і корозійну втому морських трубопроводів, спираючись на ґрунтовний аналіз умов їх експлуатації та деформаційно-кінетичне трактування процесу. Побудовано придатні для інженерних розрахунків повні криві низькочастотної втоми для сталі трубопроводу з різною структурою та зварного з'єднання і дано пояснення характерних ділянок, виявлених перегинів та розривів на кривих втоми, використовуючи кінетичні криві деформації і руйнування та комп'ютерний макроструктурний аналіз сканованих зламів.
 7. Вперше, на гладких зразках-моделях з $l_p/d = 4$ та 10 в області низькочастотної (0,8 Гц) малоциклової втоми, виявлено аномальну деформаційну поведінку текстурованої сталі 20 та зварного з'єднання, яка проявляється у виникненні деформаційних піків, зумовлених послідовним проходженням інтенсивних швидкоплинних процесів циклічного знеміцнення та зміцнення, а також інверсію втомної довговічності зварного з'єднання, що пов'язана з ефектами циклічного деформування, розкритими за допомогою кінетичних кривих деформації та діаграм циклічного кругового згину.
 8. Експериментально підтверджено можливість прискореної оцінки границі витривалості основного металу та зварного з'єднання труб за діаграмами статичного та циклічного кругового згину, а також результатами випробувань зразків-моделей з підібраними геометричними параметрами надрізу. Запропоновано методика визначення деформаційних областей низькочастотної втоми, а саме спонтанної, прогнозованої та безпечної деформації, і показано її ефективність у випадку, коли характеристики граничних станів σ_1 та $\sigma_{0,2}^{*ц}$ є малочутливими до зміни структури трубної сталі.

9. Показано, що в діапазоні $\sigma_a = 60 \dots 280$ МПа збільшення частоти навантаження від 0,8 до 50 Гц спричинює зростання довговічності сталі трубопроводу у морській воді в 5...6,7 разів, і доведено неможливість заміни низькочастотних корозійно-втомних випробовувань поширеними випробовуваннями з частотою 50 Гц, оскільки при $\sigma_a < \sigma_{-1}$ руйнування контролюється не навантаженням, а часом хімічної, фізичної та фізико-хімічної дії середовища. Розроблено способи прискореної оцінки корозійної витривалості основного металу та зварного з'єднання труб за прогнозованими ділянками кривих низькочастотної корозійної втоми, побудованими з використанням однієї або двох експериментальних точок, а також спосіб спрощеної побудови діаграм граничних напружень циклу за результатами випробовувань в статистиці та при низькочастотному навантаженні з використанням трьох характерних напружень: σ_{-1} ($\sigma_{-1\text{кор}}$), $\sigma_{0,2}^*$, $\sigma_{\text{мц}}^d$.
10. Вперше, на гладких зразках-моделях з $l_p/d = 10$ в області низькочастотного (0,8 Гц) малоциклового навантаження, виявлено аномальну деформаційну поведінку текстурованої сталі 20 у морській воді, яка відрізняється від подібної поведінки сталі у повітрі інтенсивнішим циклічним зменшенням на I стадії та менш інтенсивним повторним зменшенням на III стадії.
11. За кінетичними кривими $\delta^n - N$ виявлено складний характер впливу корозійного середовища на розвиток процесів деформації і руйнування в зоні концентратора напружень, особливо при $\sigma_a < \sigma_{\text{мц}}^k$, в результаті якого біля вершини кільцевого надрізу формується сітка одиничних корозійно-втомних тріщин, вершини яких, внаслідок електрохімічного розчинення, притуплюються, що, в цілому, призводить до перетину кривих втоми та корозійної втоми і утворення області, в якій корозійна витривалість зразків з надрізом підвищується, порівняно з повітрям, в 2 і більше разів.
12. З метою подальшого розвитку теорії низькочастотної корозійної втоми, вперше кінетичні криві $\epsilon(\epsilon_a) - t(N)$ та $-E - t(N)$ представлено в об'єднаному вигляді і відзначено відсутність кореляції між ЕП та пружно-пластичними деформаціями. Показано, що швидкоплинні процеси на початкових стадіях корозійної втоми добре простежуються за кінетичними кривими деформації, а процес накопичення та розвитку пошкоджень, коли відбувається стабілізація деформації або незначна її зміна, краще інтерпретувати за кінетичними кривими ЕП. Вперше введено поняття про кінетичний цикл росту втомної (корозійно-втомної) тріщини, який, незалежно від σ_a , може відбуватися за схемою: прискорений ріст – рівномірний ріст зі швидкістю V_1 – гальмування – рівномірний ріст зі швидкістю V_2 .

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Установа для комплексних досліджень малоциклової втоми матеріалу морських трубопроводів у робочих середовищах // Нафт. і газова пром-сть.- 2001.- № 5.- С. 44-45

2. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Прогнозування поведінки матеріалу трубопроводу за даними повторно-статичних випробовувань лабораторних зразків-моделей // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтогазопромислове обладнання.- 2001.- 4.- № 38.- С. 3-8
3. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Кінетика деформування сталі трубопроводу при низькочастотній втомі // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.- 2001.- №1.- С. 62-67
4. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Особливості деформування текстурованої сталі трубопроводу при навантаженні чистим згином // Науковий вісник Національного Технічного Університету Нафти і Газу.- 2001.- № 1.- С. 57-61
5. Побережний Л. Я. Оцінка працездатності трубопроводу з концентраторами напружень // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ.- 2002.- №2 (3).- С. 36-38
6. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів // Нафт. і газова пром-сть.- 2002.- №. 5.- С. 33-38
7. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Перспективи використання автоматизованих випробовувальних систем з ЕОМ для оцінки корозійно-механічних властивостей матеріалів морських трубопроводів // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. Вып. 1/2001 (10)- Кременчук: КГПУ, 2001.- С. 21-23
8. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я., Ровінський В. А. Удосконалена автоматизована випробовувальна система з ЕОМ для дослідження корозійно-механічного руйнування // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ.- Кременчук: КДПУ, 2002.- Вип. 1(12).- С. 292-294
9. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Низькочастотна корозійна втома сталі морських трубопроводів // Фіз. хім. механіка матеріалів. Спец. вип. № 3. Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів.- 2002.- Т. 2.- С. 794-797
10. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Деформаційна поведінка сталі трубопроводу при низькочастотній втомі // Трибофатика: Пр. 4-го Міжнародного симпозіуму з трибофатики, 23-27 вересня 2002 р., Тернопіль (Україна) / Відп. ред. В. Т. Трошенко.- Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя, 2002.- Т. 1.- С. 296-300
11. Крыжанивский Е. И., Побережный Л. Я. Исследование несущей способности стали морских трубопроводов при низкочастотной усталости // Электронный журнал "Исследовано в России".- 2001.- С. 1083-1089
<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/098.pdf>
12. Побережний Л. Я. Сопроотивление стали трубопровода деформации при статическом ступенчатом нагружении // Динамика, прочность и износостойкость машин.- 2002.- Вып. 9.- С. 3-8
13. Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Спосіб оперативної діагностики зломів матеріалів / Деклараційний патент № 46499А, кл. 7 G01N21/00, G01N3/00.

Держдепартамент ІВ, Бюл. № 5. 15.05.2002

14. Побережний Л. Я. Комп'ютеризована установка для корозійно-механічних випробовувань матеріалу морських трубопроводів // Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць I Всеукраїнської науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 15-16 травня 2001р.- Донецьк: ДонДТУ, 2001.- С. 172-174
15. Побережний Л. Я., Ровінський В. А. Вимірювальний комплекс з АЦП на основі мікросхеми AD7714 // Автоматизація технологічних об'єктів і процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць II Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 25-26 квітня 2002р.- Донецьк: ДонДТУ, 2002.- С. 199-201
16. Побережний Л. Я., Шишкін В. О. Використання діаграм граничних напружень для прогнозування втомного та корозійно-втомного руйнування матеріалу морських трубопроводів // Тези наук.-техн. конф. проф.-викл. складу унів-ту, Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2001.- С. 50-52

Анотація

Побережний Л. Я. Закономірності деформації і руйнування морських трубопроводів при статичному та низькочастотному навантаженні.- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища.- Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2002.

Створено та науково обґрунтовано ефективність розширеної інженерної методики дослідження деформації і руйнування матеріалу морських трубопроводів при статичному та низькочастотному навантаженні з урахуванням впливів структури, масштабного фактору, концентрації напружень, частоти навантаження, асиметрії циклу напружень, агресивності середовища, а також комбінації цих впливів. Розроблено автоматизовану випробувальну систему з ЕОМ та оригінальне програмне забезпечення для комплексних досліджень в кінетиці деформації, руйнування, електродного потенціалу матеріалу трубопроводу в робочих (технологічних) середовищах, а також сканованих поверхонь зламів, забезпечуючи імітацію умов навантаження елемента трубопроводу. Введено комплексне поняття про малоциклову та багатоциклову низькочастотну втому і корозійну втому морських трубопроводів, спираючись на ґрунтовний аналіз умов їх експлуатації та деформаційно-кінетичне трактування процесу. Побудовано повні криві низькочастотної втоми для сталі трубопроводу з різною структурою та зварного з'єднання. Вперше, в області низькочастотної (0,8 Гц) малоциклової втоми та корозійної втоми, виявлено аномальну деформаційну поведінку текстурованої сталі 20 та зварного з'єднання, яка проявляється у виникненні деформаційних піків. З метою подальшого розвитку теорії низькочастотної корозійної втоми, вперше кінетичні криві деформації та електродного потенціалу представлено в об'єднаному вигляді, а їх аналіз виконується комплексно з графічною інтерпретацією макробудови поверхні руйнування. Запропоновано способи

прискореної оцінки корозійної витривалості основного металу та зварного з'єднання труб за прогнозованими ділянками кривих низькочастотної корозійної втоми, побудованими з використанням однієї або двох експериментальних точок. Вперше введено поняття про кінетичний цикл росту втомої (корозійно-втомої) тріщини. Показано, що тривалість кінетичного циклу є важливою характеристикою низькочастотної втоми, чутливою до величини σ_a та впливу середовища. Запропоновано методику визначення деформаційних областей низькочастотної втоми морських трубопроводів, а саме спонтанної, прогнозованої та безпечної деформації, і показано її ефективність у випадку, коли характеристики граничних станів є малочутливими до зміни структури трубної сталі.

Ключові слова: морські трубопроводи, низькочастотна втома, корозійна втома, руйнування трубопроводів, конструкційна міцність, деформаційна область, електродний потенціал, кінетика деформації, поверхня руйнування, зварне з'єднання.

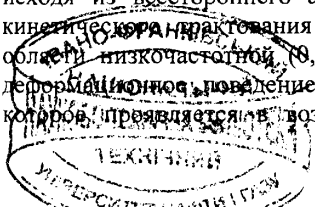
Анотація

Побережный Л. Я. Закономерности деформации и разрушения морских трубопроводов при статическом и низкочастотном нагружении.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – нефтегазопроводы, базы и хранилища.- Иванов-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Иванов-Франковск, 2002.

Создана автоматизированная испытательная система с ЭВМ для комплексных исследований в кинетике деформации, разрушения, ЭП материала трубопровода при статическом и низкочастотном нагружении в рабочих (технологических) средах, используя разработанные конструкции образцов-моделей, изготовленных из стенки трубы. Предложены и определены в статике нестандартные характеристики упругости, пластичности, деформационного упрочнения, ползучести для объяснения поведения стали в конструкции трубопровода и уточнения расчетов. Построены полные кривые низкочастотной усталости для стали трубопровода с разной структурой и сварного соединения по результатам испытаний образцов-моделей с конструктивными концентраторами и без. Показана возможность оценки влияния среды на величину разрушающих циклических напряжений по площади долома образца-модели. В условиях низкочастотного нагружения подтверждена локализация коррозионных процессов в зоне сварного соединения около границы раздела фаз „основной металл – сварной шов”.

Введено комплексное понятие о малоцикловой и многоцикловой низкочастотной усталости и коррозионной усталости морских трубопроводов, исходя из всестороннего анализа условий их эксплуатации и деформационно-кинетическо-рентгенографирования процесса. Впервые, на гладких образцах-моделях в области низкочастотной (0,8 Гц) малоцикловой усталости, выявлено аномальное деформационное поведение текстурированной стали 20 и сварного соединения, которое проявляется в возникновении деформационных пиков, обусловленных



последовательным прохождением интенсивных быстротечных процессов циклического разупрочнения и упрочнения, а также инверсию усталостной долговечности сварного соединения, которая связана с эффектами циклического деформирования, раскрытыми с помощью кинетических кривых деформации и диаграмм циклического кругового изгиба. Зарегистрировано аномальное деформационное поведение текстурованной стали 20 в морской воде, которое отличается от подобного поведения стали в воздухе более интенсивным процессом циклического разупрочнения на I стадии и менее интенсивным процессом повторного разупрочнения на III стадии. С целью дальнейшего развития теории низкочастотной коррозионной усталости, впервые кинетические кривые деформации и ЭП представлены в объединенном виде, а их анализ выполняется комплексно с графической интерпретацией макростроения сканированного излома и развертки рабочей поверхности разрушенного образца. Введены понятия о кинетическом цикле роста усталостной (коррозионно-усталостной) трещины и показано, что его продолжительность при низкочастотном нагружении является важной характеристикой, чувствительной к величине амплитуды напряжений σ_a и влиянию среды.

Разработаны: оригинальное программное обеспечение для записи измеряемых величин в файл, построения графиков в режиме реального времени, автоматического регулирования частоты измерений с целью качественного отслеживания быстротечных процессов; способ оперативной диагностики изломов материалов; способ определения при ступенчатом нагружении чистым изгибом условного предела текучести $\sigma_{0,2}^*$ напряжения, при котором пластическая деформация $\Delta \epsilon_{пл} = \epsilon_r \cdot 0,002$; способ определения величины критического раскрытия надреза $\delta_{кр}^*$, который соответствует пределу прочности повторно-деформированных образцов с надрезом $\sigma_{мц}^{кл}$; способы ускоренной оценки предела выносливости основного металла и сварного соединения труб по диаграммам статического и циклического кругового изгиба, а также по результатам испытаний образцов-моделей с подобранными геометрическими параметрами надреза; способы ускоренной оценки коррозионной выносливости материала трубопровода по прогнозируемым участкам кривых низкочастотной коррозионной усталости, построенным с использованием одной или двух экспериментальных точек; способ упрощенного построения диаграмм предельных напряжений цикла по результатам испытаний в статике и при низкочастотном нагружении; новый методический подход к оценке пластичности и определения предельной остаточной деформации $\Delta \epsilon_{гр}$, при которой эксплуатация сварного соединения может считаться еще безопасной, основанный на построении кривых „номинальное напряжение σ – остаточная деформация $\Delta \epsilon_s$ ”; методику определения деформационных областей низкочастотной усталости, а именно спонтанной, прогнозируемой и безопасной деформации, и показана ее эффективность в случае, когда характеристики предельных состояний малочувствительны к изменению структуры трубной стали.

Расширенную инженерную методику исследования деформации и разрушения

морских трубопроводов внедрено на предприятиях ГАО «Черноморнефтегаз».

Ключевые слова: морские трубопроводы, низкочастотная усталость; коррозионная усталость, разрушение трубопроводов, конструкционная прочность, деформационная область, электродный потенциал, кинетика деформации, поверхность разрушения, сварное соединение.

Summary

Poberezhny L. Ya. Regularities of deformation and failure of submarine pipelines under static and low frequency loading. - Manuscript.

Thesis for Candidate of Sciences degree in speciality 05.15.13 – oil and gas pipelines, oil reservoirs and gas storages. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2002.

It is created automated test system with computer for complex studies of the deformation, fracture, electrode potential of pipeline steel under static and low frequency loading in technological environments. Full curves of low frequency fatigue and corrosion fatigue of textured and not textured steel and welded joint of pipes was presented.

The complex concepts of low cycle and high cycle low frequency fatigue and corrosion fatigue of sea pipelines was offered. For the first time, in the field of low frequency (0,8 Hz) fatigue and corrosion fatigue, is revealed anomalous deformation behaviour textured steel 20 and welded joint, which reveals itself in deformation peaks. For the first time kinetic curves of deformation and electrode potential are presented in united type for the reason deepened their analysis, which is executed in complex with graphic interpretation of fracture surfaces macrostructure.

Keywords: submarine pipelines, low frequency fatigue, corrosion fatigue, pipeline failure, construction toughness, deformation area, electrode potential, kinetics of deformation, fracture surface, welded joint.