

КІНЕТИКА ДЕФОРМАЦІЇ ТА ЕЛЕКТРОДНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СТАЛІ ТРУБОПРОВОДУ ЗА НИЗЬКОЧАСТОТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ У МОРСЬКІЙ ВОДІ

Л.Я. Побережний

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42243,
e-mail: p o b e r e z h n y @ n u n g . e d u . u a

Проведено корозійно-втомні випробовування матеріалу морських підводних трубопроводів. Вперше на гладких зразках-моделях в області низькочастотного (0,8 Гц) малоциклового навантаження виявлено аномальну деформаційну поведінку матеріалу трубопроводу (текстурованої сталі 20) у морській воді з утворенням характерних деформаційних піків. З метою подальшого розвитку теорії низькочастотної корозійної втоми вперше кінетичні криві деформації та електродного потенціалу представлено в об'єднаному вигляді. 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 електродного потенціалу.

Ключові слова: низькочастотна корозійна втома, морські трубопроводи, електродний потенціал, аномальна деформаційна поведінка

Проведены коррозионно-усталостные испытания материала морских подводных трубопроводов. Впервые на гладких образцах-моделях в области низкочастотной (0,8 Гц) малоциклового нагружения зафиксировано аномальное деформационное поведение материала трубопровода (текстурированной стали 20) в морской воде с образованием характерных деформационных пиков. С целью дальнейшего развития теории низкочастотной коррозионной усталости впервые кинетические кривые деформации и электродного потенциала представлены в объединенном виде. Показано, что быстротечные процессы на начальных стадиях коррозионной усталости хорошо прослеживаются по кинетическим кривым деформации, а процесс накопления и развития повреждений, когда происходит стабилизация деформации или незначительное ее изменение, лучше интерпретировать по кинетическим кривым электродного потенциала.

Ключевые слова: низкочастотная коррозионная усталость, морские трубопроводи, электродный потенциал, аномальное деформационное поведение

Corrosion fatigue material testing of sea pipelines was conducted. For the first time, anomalous of deformation of pipeline material behaviour was recorded on the smooth specimens-models in the field of low-frequency low-cycle loading in the sea water with the deformation peaks formation. Firstly, kinetic curve deformations and electrode potential are presented in a combined form for the further low-frequency corrosion fatigue development. It is shown that quickly run processes at the initial stages are easily traced due to kinetic curves of the deformation and it is better to interpret the processes of accumulation and lesions development, during deformation stabilization or its negligible change due to the kinetic curves of the electrode potential

Keywords: low-frequency corrosion fatigue, offshore pipelines, electrode potential, abnormal deformation behaviour

Сьогодні визнається, що найнебезпечнішим є низькочастотне втомне та корозійно-втомне руйнування несучих елементів морських трубопроводів, яке важко діагностувати. Це пов'язано як з умовами експлуатації, так і зі специфікою прояву низькочастотного навантаження, особливо якщо врахувати, що вплив середовища та змінних напружень має часову залежність. Криві корозійної втоми трубних сталей не розкривають стадійності цього складного процесу, що не дозволяє достатньо точно прогнозувати ресурс роботи, залишковий ресурс роботи, ресурс роботи конструкції з моменту пошкодження покриття.

Вперше в середовищі морської води здійснено паралельну комп'ютерну реєстрацію кінетики деформації та електродного потенціалу сталі трубопроводу за низькочастотного навантаження з наступним скануванням корозійно-втомних зламів [1] та інтерпретацією одержаних цифрових відбитків сумісно з кінетичними

кривими. Встановлено, що морська вода при $\sigma_a = 420$ МПа (верхня границя області малоциклової втоми) дещо знижує порівняно з повітрям довговічність сталі, проте п'ятистадійна кінетика деформації з характерним піком залишається (рис. 1). Параметри деформаційних піків, сформованих протягом I та II стадій, у морській воді та повітрі різні (рис. 2).

Висота піку у морській воді відчутно більша, ніж в повітрі, що можна пов'язати з адсорбційним впливом електроліту (ефект Ребіндера) на швидкоплинне протікання процесів циклічного знеміцнення на I стадії (діл. АВ) та циклічного зміцнення на II стадії (діл. ВС) в сприятливих умовах низькочастотного навантаження. В результаті вихід на ділянку CD (початок повторного деформаційного знеміцнення на III стадії) в корозійному середовищі відбувається при величині $\Delta\epsilon^n$ приблизно в чотири рази більший, ніж в повітрі (рис. 2). Судячи з нахилу

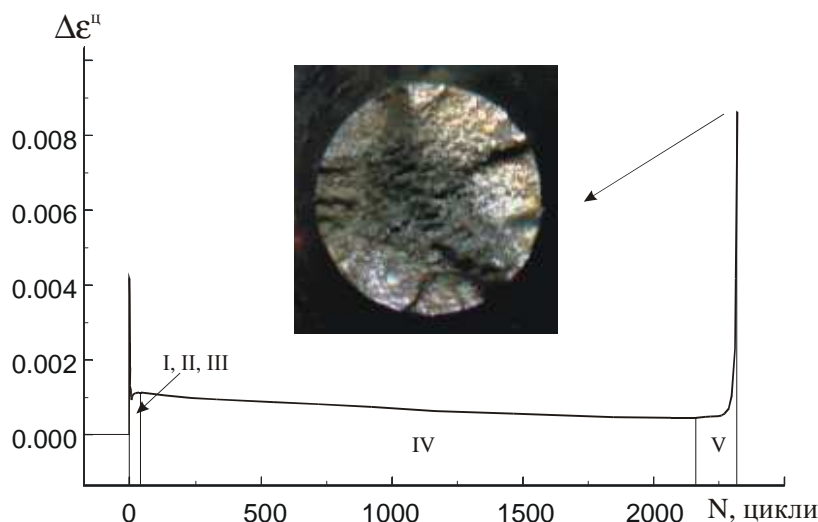


Рисунок 1 – Аномальна деформаційна поведінка текстурованої сталі трубопроводу при низькочастотній корозійній втомі ($\sigma_a = 420$ МПа)

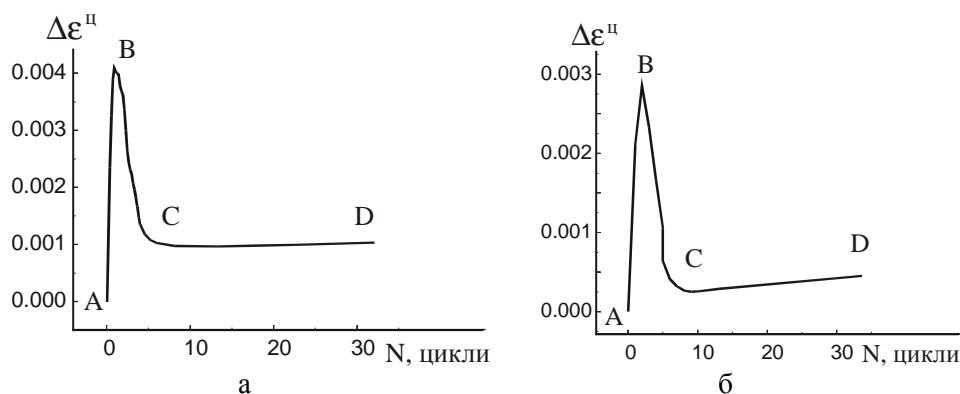


Рисунок 2 – Деформаційні піки у морській воді (а) та повітрі (б)

ділянок CD, процес повторного знеміцнення у морській воді протікає повільніше.

Попри те, що перші сліди корозії на поверхні зразка з'являються приблизно через 50 циклів навантаження, тобто на III стадії, вплив корозійного фактора на деформаційні зміни протягом IV стадії виражений слабо. Якщо на повітрі ця найтриваліша стадія протікає з практично незмінною амплітудою деформації ϵ_a , то в корозійному середовищі спостерігається незначне, але стабільне повторне деформаційне зміцнення (рис. 1) протягом приблизно 1500 циклів, після якого приріст циклічної деформації $\Delta\epsilon^{II}$ поступово стабілізується і, починаючи з ~ 2000 циклів аж до початку V стадії $\Delta\epsilon^{II} = \text{const}$.

На V стадії прискорений ріст корозійновтомних тріщин (як і втомних тріщин у повітрі) призводить до формування подібних поверхонь зламів, оскільки корозійне середовище найсильніше впливає на процес зародження тріщин, а ріст тріщин контролюють напруження.

При зменшенні σ_a до 380 МПа дія морської води порівняно з повітрям проявляється в тому, що п'ятистадійна кінетика деформації трансформується у тристадійну (рис. 3, а), тобто зникають деформаційні піки, а циклічне знеміцнення стає довготривалим процесом, що охоплює I та II стадії. Швидкість збільшення $\Delta\epsilon^{II}$ на

I стадії носить затухаючий характер, а на II стадії практично залишається постійною до початку III стадії [2].

Відносна тривалість стадій залежить від амплітуди напружень і при $\sigma_a = 380$ МПа відповідно складає 13,85 (I), 71,96 (II) та 14,19 % (III) від загальної довговічності $N = 7400$ циклів. При зменшенні σ_a від 420 до 380 МПа відносна тривалість завершальних III та V стадій зростає; на повітрі така залежність не спостерігається [2].

Макрокартина зламу при $\sigma_a = 380$ МПа характерна тим (рис. 3, а), що зона долому зміщена від центру перерізу зразка, а в корозійновтомній зоні знаходиться лише одна, невелика за площею, поглиблена ділянка з уступами.

При $\sigma_a = 310$ МПа пластична складова деформації в статистиці вже незначна (рис. 3.б, г), оскільки $\sigma_{0,2}^* = 273$ МПа, і тому приріст $\Delta\epsilon^{II}$ на I стадії теж відносно невеликий (рис. 3, б), хоча загальні закономірності зміни $\Delta\epsilon^{II}$ зі збільшенням N залишаються такими ж, як і при $\sigma_a = 380$ МПа.

Відносна тривалість I, II та III стадій при $\sigma_a = 310$ МПа відповідно складає 10,04; 63,83 і 26,13 % від загальної довговічності $N = 25732$ цикли, що вказує на подальше зростання відно-

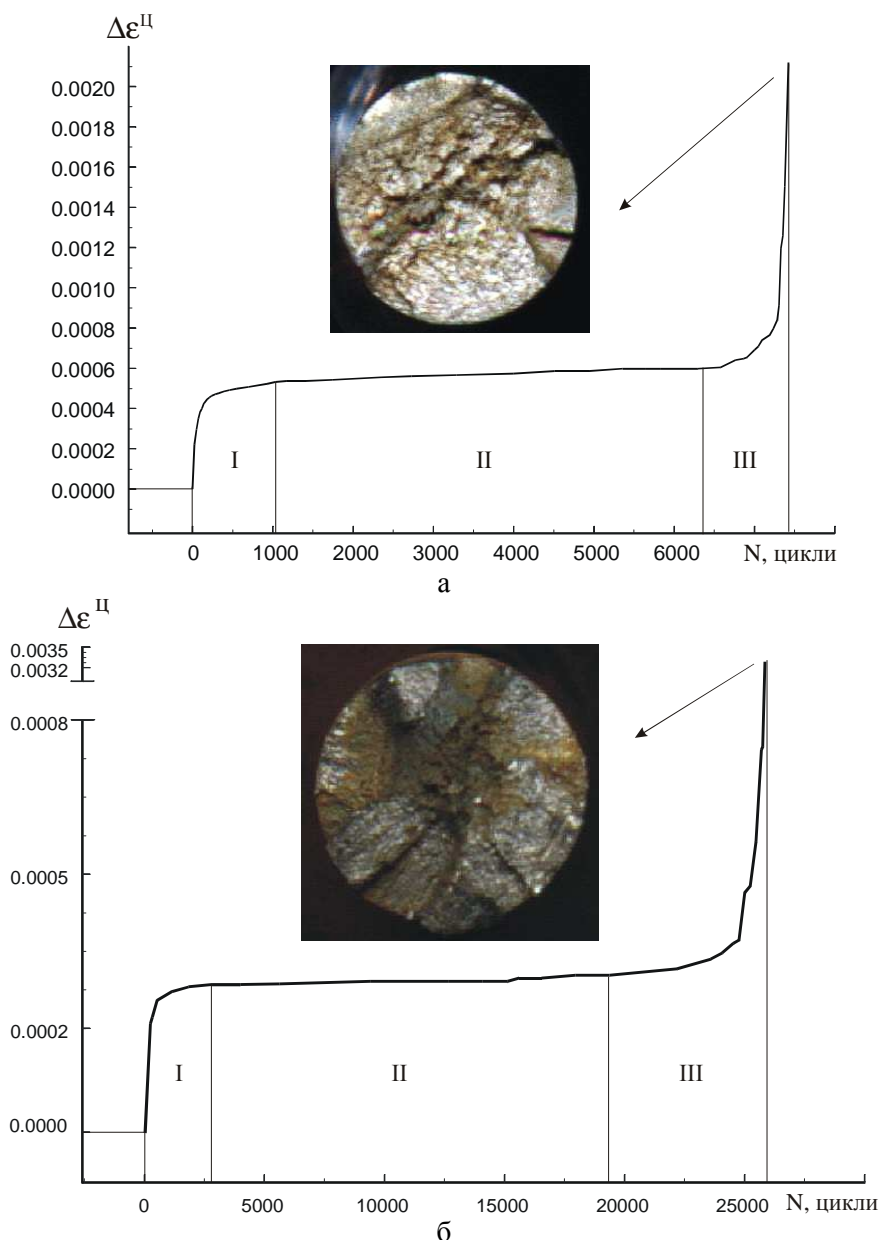


Рисунок 3 – Зміна амплітуди пластичної деформації текстурованої сталі трубопроводу у морській воді при 380 (а) та 310 МПа (б)

сної тривалості III стадії при зменшенні σ_a від 380 до 310 МПа. Причину цього певною мірою пояснюють фрактографічні дослідження.

При $\sigma_a \leq \sigma_1$, тобто в області необмеженої втоми довговічності, типовою є деформаційна поведінка сталі з повільним зростанням протягом II стадії $\Delta \epsilon^{II}$ зі швидкістю, що характеризується кутом β (рис. 4), який при зниженні σ_a зменшується.

Відносна тривалість циклічного зменшення на першій стадії багатоциклової корозійної втоми невелика (табл. 1), проте тривалість цього процесу, виражена в циклах, є величиною одного порядку із величиною N при малоцикловій корозійній втомі (рис. 1).

Те ж стосується вираження тривалості III стадії, величина якої відповідає залишковій довговічності і легко знаходиться з кінетичних кривих (рис. 4), досягаючи при $\sigma_a = 140$ МПа величини 10^5 циклів.

Перехід від корозійно-втомної зони до долому досить чіткий, що при $\sigma_a > \sigma_{0,2}^*$ не спостерігається.

Важливу інформацію про низькочастотну корозійну втому сталі трубопроводу дають кінетичні криві електродного потенціалу, отримані в ході випробувань паралельно з кінетичними кривими деформації.

Електродний потенціал (ЕП) є надзвичайно важливою характеристикою матеріалу, оскільки його величина впливає на характер та швидкість проходження катодних і анодних процесів, а також термодинамічну можливість чи неможливість їх протікання в даних умовах. Дослідження кінетики ЕП в умовах, близьких до експлуатаційних, мають велике практичне значення тому, що без них неможлива правильна хімічна інтерпретація корозійних процесів.

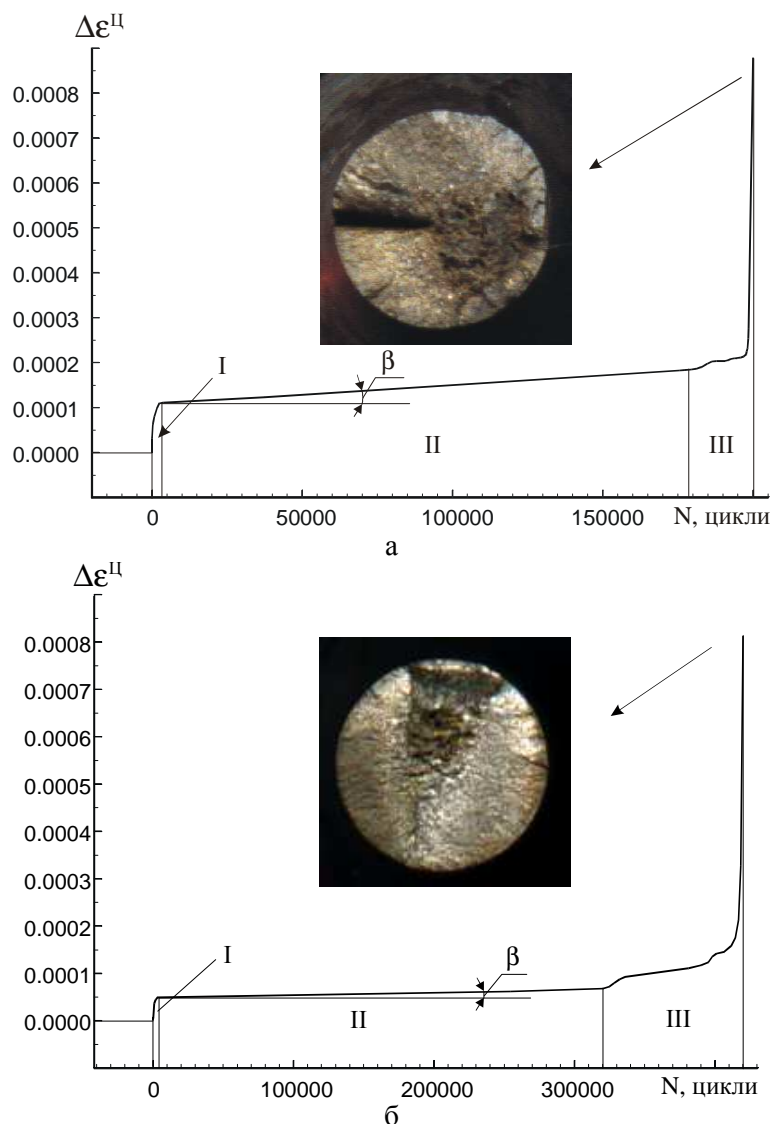


Рисунок 4 – Кінетика пластичної деформації текстурованої сталі трубопроводу у морській воді при $\sigma_a = 180$ МПа (а) та 140 МПа (б)

Таблиця 1 – Тривалість деформаційних стадій низькочастотної багатocyклової корозійної втоми при $\sigma_a \leq \sigma_{-1}$

Амплітуда напружень, МПа	Тривалість стадій, %			Число циклів до руйнування
	1	2	3	
180	2,00	87,50	10,50	200000
140	0,95	75,24	23,81	420000

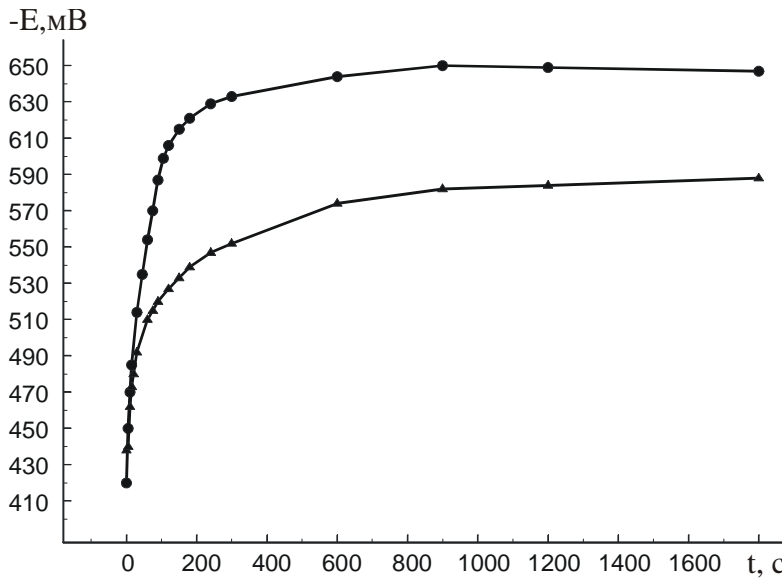
На величину ЕП та характер його зміни впливають різноманітні чинники. Насамперед це – рельєф та хімічна чистота поверхні, на якій проходять основні електрохімічні процеси. Механообробка значно активізує поверхню сталі, що сприяє швидкому розблагородженню (зменшенню ЕП) (рис. 5).

Різниця досить значна і складає 50...60 мВ. Тому, з метою нівелювання впливу даного чинника на результати експерименту, усі дослідні зразки-моделі витримувалися в ексикаторі протягом 24 год.

Кінетика ЕП в процесі статичного та наступного низькочастотного малоциклового навантаження показана на рис. 6.

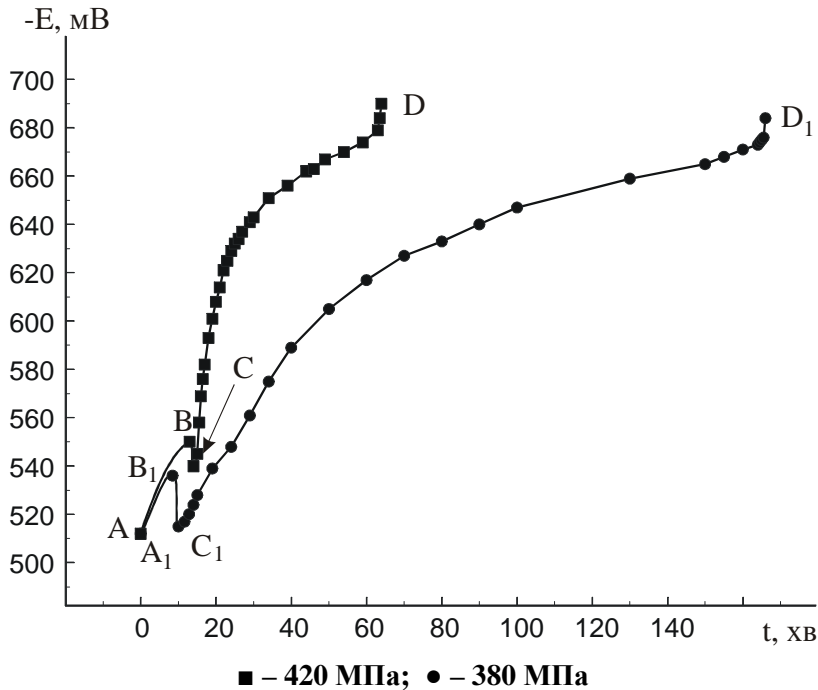
На ділянках АВ та А₁В₁, що відповідають ступінчастому статичному навантаженню, відбувається монотонне спадання ЕП, тим більше, що збільшується з підвищенням σ_a . Взаємне розташування цих ділянок, а також їх порівняння з відповідною ділянкою ненавантаженого зразка (рис 5), вказує на більшу залежність зміни ЕП від часового фактору, ніж від напружень.

Протягом перших циклів навантаження проходить стрімке зростання ЕП відповідно на 10 мВ на ділянці ВС при $\sigma_a = 420$ МПа та 20 мВ на ділянці В₁С₁ при $\sigma_a = 380$ МПа, що може мати наступне пояснення.



● – полірування та витримка 1 хв; ▲ – полірування та витримка в ексикаторі 24 год.

Рисунок 5 – Залежність кінетики електродного потенціалу зразка від часу витримки після механічної обробки поверхні (текстурована сталь 20, $T = 293\text{ K}$, $\sigma = 0$)



■ – 420 МПа; ● – 380 МПа

Рисунок 6 – Кінетика електродного потенціалу текстурованої сталі 20 у морській воді

У процесі низькочастотного обертання навантаженого зразка у морській воді виникають потоки, які змивають з його поверхні частину адсорбованих агресивних йонів розчинних солей, що полегшує процес десорбції та утруднює повторну первинну та вторинну адсорбцію. Це призводить до сповільнення електродних процесів та зростання ЕП. З іншого боку, з перших циклів навантаження відбувається інтенсивне циклічне знеміцнення (рис. 1, 3, а), яке супроводжується макроскопічною пластичною деформацією (плинністю) та активацією поверхні за рахунок утворення екструзій та інтрузій, що представляють собою ювенільні поверхні з набагато нижчим ЕП. В місцях дефектів утворю-

ються субмікротріщини, які відіграють роль гальванічних елементів (ГЕ), активізуючи при цьому електродні процеси [3]. Активація поверхні, викликана циклічним навантаженням, швидко компенсує дію потоків середовища, і зростання ЕП припиняється.

При подальшому накопиченні пошкоджень відбувається спадання ЕП на ділянках CD та C_1D_1 (рис. 6). Глибина потенціальної ями при збільшенні σ_a зменшується, оскільки зростання σ_a сприяє швидкому накопиченню пошкоджень. З тієї ж причини спадання ЕП на ділянці CD при 420 МПа відбувається швидше, ніж на ділянці C_1D_1 при 380 МПа. Воно має затухаючий характер, оскільки процес накопичення пошко-

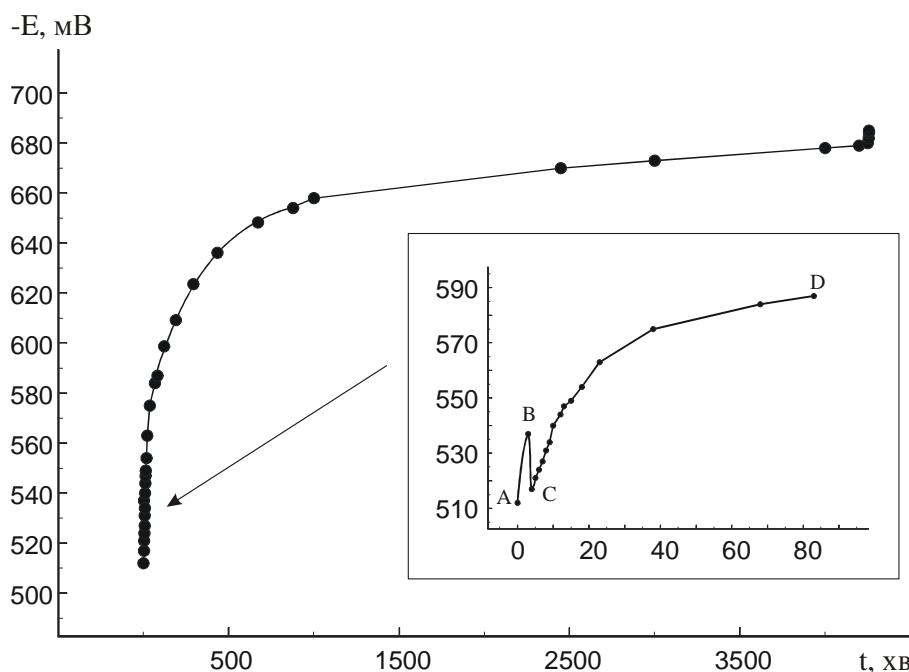


Рисунок 7 – Кінетика електродного потенціалу текстурованої сталі 20 у морській воді (180 МПа)

джен змінюється процесом збільшення та поглиблення вже існуючих дефектів. Крім того, зразок поступово вкривається плівкою продуктів корозії, що сприяє пасивації поверхні та локалізації електродних процесів у місцях дефектів. Однак повної стабілізації, як у випадку навантаженого зразка (рис. 5), не спостерігається через те, що в області високих σ_a значні деформації призводять до відшарування продуктів корозії і, відповідно, депасивації.

Наприкінці ділянки CD починається швидке спадання ЕП, пов'язане з поширенням магистральної тріщини, під час якого відбувається утворення значної за площею ювенільної поверхні; на стадії доламу стрибок ЕП становить 10-20 мВ.

В області низькочастотної багаточислової корозійної втоми кінетика ЕП (рис. 7) загалом подібна до розглянутої (рис. 6).

Як і очікувалося, глибина потенціальної ями збільшується, і при $\sigma_a = 180$ МПа становить ~ 30 мВ. Швидкість спадання ЕП на ділянці CD при зниженні σ_a зменшується, оскільки при цьому сповільнюється процес накопичення та розвитку пошкоджень.

Затухання ЕП характеризується виходом на майже лінійну ділянку, що відповідає пасивації поверхні нерозчинними продуктами корозії. Відбувається практично повна локалізація електродних процесів в місцях дефектів з утворенням корозійних пітів та відповідних первинних і вторинних ГЕ [3]. Паралельно розвивається декілька корозійно-втомних тріщин, причому їх ріст досить повільний, на що вказує частково запасивована продуктами корозії поверхня зламу (рис. 4). Підтвердженням цього є і менша висота стрибка ЕП на стадії остаточного руйнування, оскільки площа свіжоутвореної поверхні відносно мала.

З метою поглибленого аналізу взаємозв'язку процесів деформації та руйнування і впливу на них корозійно-активного середовища пропонується кінетичні криві ЕП та деформації представляти об'єднано (рис. 8).

Встановлено, що при статичному (I) та низькочастотному (II) навантаженні ЕП не корелює з пружно-пластичними деформаціями.

У процесі того, як у стації під дією зростаючого напруження послідовно відбувається пружна та пружно-пластична деформація, а при фіксованому навантаженні і повзучість, ЕП монотонно зростає з тенденцією до затухання.

За низькочастотного навантаження потенціальна яма не пов'язана з деформаційним піком, хоча її глибина залежить від σ_a .

Саме відсутність кореляції між кінетикою деформації та ЕП робить необхідним сумісне вивчення цих двох процесів. Електродний потенціал, з одного боку, є чутливим до дії різноманітних сторонніх чинників, а з іншого – дозволяє спостерігати за процесом накопичення та розвитку пошкоджень, коли відбувається стабілізація деформації або незначна її зміна.

Як свідчать результати досліджень (рис. 6, 7), ЕП початку руйнування практично не залежить від σ_a , що дозволяє прогнозувати залишкову довговічність у корозійному середовищі за кінетичними кривими ЕП.

Швидкоплинні процеси на початкових стадіях корозійної втоми, добре простежувані за кінетичними кривими деформації, кінетика ЕП ілюструє не найкраще, через інерційність цього параметра.

Таким чином, поведінка сталі трубопроводу за статичного та низькочастотного навантаження в корозійному середовищі розкривається за допомогою кривих « ϵ_a – t (N)», «-E – t (N)» під різним кутом зору, що особливо важливо

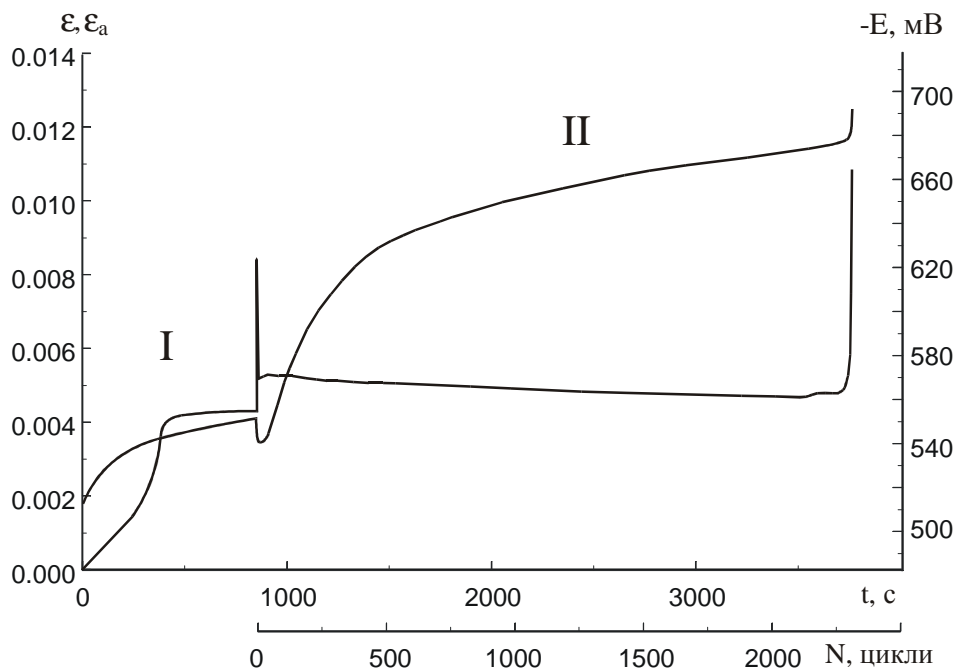


Рисунок 8 – Кінетичні криві деформації та електродного потенціалу текстурованої сталі трубопроводу при статичному (I) та низькочастотному (II) навантаженні у морській воді (420 МПа)

для розвитку теорії низькочастотної корозійної втоми. Розглянуті явища вказують на недостатність класичних методів розрахунку на міцність несучих елементів конструкцій морських трубопроводів за пружним чи пластичним станом та на необхідність їх доповнення новими методами, які враховують закономірності деформації, зародження та розвитку тріщин, зміни фізико-механічних характеристик в процесі експлуатації тощо.

Література

- 1 Крижанівський Є.І. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Нафт. і газова пром-сть. – 2002. – № 5. – С. 33-38
- 2 Крижанівський Є.І. Кінетика деформування сталі трубопроводу при низькочастотній втомі / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – № 1. – С. 62-67
- 3 Петров Л.М. Фізико-хімічні аспекти механіки корозійного руйнування // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – № 3. – С. 127-129

Стаття надійшла до редакційної колегії
11.03.11
Рекомендована до друку професором
Грудзом В.Я.