

622.632.4(26) (043)
ПЗЗ

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Пиріг Тарас Юрійович



622.632.4(26)(043)

УДК 621.643

ПЗЗ

**ВПЛИВ ПЕРЕДЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ
В ПРОЦЕСІ УКЛАДАННЯ НА РЕСУРС БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
МОРСЬКИХ ТРУБОПРОВІДІВ**

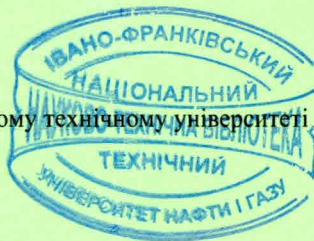
Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.



Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Побережний Любомир Ярославич,
професор кафедри хімії Івано-Франківського
національного технічного університету нафти і газу

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Банахевич Юрій Володимирович,
начальник відділу магістральних газопроводів і
газорозподільних станцій ПАТ “Укртрансгаз”
НАК “Нафтогаз України”

кандидат технічних наук
Драгілев Андрій Володимирович,
директор ПП “Інжинірингові технології”

Захист відбудеться “20” листопада 2013 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий “18” жовтня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04
к.т.н., доцент

Л.Д. Пилипів



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

теми. На сьогоднішній день пошуками, розвідкою та видобутком нафти і газу на континентальному шельфі займаються понад 100 країн, в число яких входить і Україна, яка володіє значним енергетичним потенціалом Чорноморсько-Азовського регіону. Він має велике стратегічне значення для держави з огляду на гостру необхідність зменшення тотальної залежності від поставок російських енергоносіїв. Потенційні запаси вуглеводнів на українському шельфі Чорного і Азовського морів оцінюються в 2,3 млрд. тонн умовного палива, що за даними Державної служби геології та надр України становить близько 40 % усіх енергетичних запасів України. При цьому запаси нафти і газу на українській ділянці шельфу Чорного моря розвідані лише на 4-5 %.

З 2012 року ДАТ “Чорноморнафтогаз” значно інтенсифікував розробку морського шельфу. Закуплено дві сучасні самопідйомні плаваючі бурові установки (СПБУ), які за даними компанії стануть найбільш високотехнологічними та глибоководними установками на Чорному морі. Їхнє використання дасть можливість працювати на глибинах до 120 м і бурити свердловини глибиною до 9000 м. З можливостями і роботою двох нових СПБУ ДАТ “Чорноморнафтогаз” безпосередньо пов’язує плани щодо збільшення до 2015 року річного видобутку природного газу на шельфі Чорного і Азовського морів утричі (до 3 млрд м³) та, відповідно, зниження залежності України від імпорتنих енергоносіїв.

В процесі тривалої експлуатації (30 років і більше), яка проходить у постійній взаємодії з морським середовищем, відбувається закономірна зміна напружено-деформованого стану (НДС) несучих елементів трубопроводу при найрізноманітніших комбінаціях статичних та динамічних навантажень і впливів, які істотно впливають на його ресурс. Однак, безвідмовна робота морського трубопроводу протягом проектного терміну експлуатації також значною мірою визначається історією передексплуатаційних навантажень під час його укладання. Тому актуальними є дослідження впливу навантажень в процесі спорудження на ресурс безпечної експлуатації та несучу здатність морських трубопроводів.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлена дисертаційна робота виконана в рамках Енергетичної стратегії України на період до 2030 року та госпдоговірної теми №121/1083-2011 “Розробка і впровадження пристрою для дослідження структури багатофазового потоку експлуатаційних свердловин у морських умовах” між ІФНТУНГ та ДАТ “Чорноморнафтогаз”.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є дослідження впливу передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на ресурс безпечної експлуатації та несучу здатність морських трубопроводів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розширення методики моделювання та розробка методики оцінки впливу передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів.
2. Встановлення закономірностей впливу передексплуатаційних навантажень на фізико-механічні характеристики матеріалу морських трубопроводів.

3. Вивчення впливу передексплуатаційних навантажень на втомні та корозійно-втомні характеристики сталі трубопроводу.
4. Дослідження деформаційної поведінки матеріалу трубопроводу на повітрі та в середовищі морської води для визначення впливу передексплуатаційних навантажень на ресурс безпечної експлуатації трубопроводу.
5. Вивчення впливу передексплуатаційних навантажень на електрохімічну поведінку матеріалу трубопроводу.

Об'єкт дослідження. Морські магістральні газонафтопроводи.

Предмет дослідження. Вплив передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на кінетику деформації, руйнування і електродного потенціалу та на ресурс безпечної експлуатації морських газонафтопроводів.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження проводили на основі сучасних методів механіки руйнування, корозійного руйнування та електрохімії. Експериментальні дослідження виконували з використанням методів тензометрії та потенціометрії за раніше розробленою методикою на базі створеної автоматизованої випробувальної системи з ЕОМ, що дозволяє отримати високу точність та достовірність результатів експерименту і якісно відстежити кінетику деформації, руйнування та електродного потенціалу матеріалу трубопроводу. Фрактографічні дослідження проводили за допомогою металографічного мікроскопа Meiji ML8000 та електронного мікроскопа PEM-106I.

Наукові положення, що захищаються. Закономірності впливу передексплуатаційних навантажень на опір втомі та корозійній втомі матеріалу морських трубопроводів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше побудовано криві втоми та ділянки кривих корозійної втоми для зразків основного металу та зварного з'єднання морського трубопроводу з урахуванням передексплуатаційних навантажень за моделлю S- та J-методів укладання на підставі підходів механіки руйнування, корозійного руйнування та міцності матеріалів. Одержані криві дають змогу визначати довговічність матеріалу морського трубопроводу з цілісним та пошкодженим ізоляційним покриттям в процесі експлуатації залежно від способу будівництва та рівня механічних напружень в процесі укладання.
2. Встановлено основні закономірності впливу навантажень на стадії укладання на деформаційну поведінку основного металу та зварного з'єднання морських трубопроводів в процесі експлуатації шляхом запису кінетики деформації в режимі реального часу. Запропоновано спосіб визначення ресурсу безпечної експлуатації морських трубопроводів, спираючись на деформаційно-кінетичне трактування процесу. Експериментально доведено, що оцінка ресурсу безпечної експлуатації у відносних величинах дає змогу нівелювати вплив розкиду довговічностей зразків і пов'язаних з цим похибок розрахунку в межах одного рівня напружень, на основі чого введено поняття "відносний ресурс безпечної експлуатації".
3. Показано збільшення неомогенності та появу дефектності в структурі основного металу та зварного з'єднання трубопроводу внаслідок передексплуатаційних навантажень, яке призводить до істотного зменшення

довговічності та опору деформаціям порівняно з вихідним станом, що підтверджується порівняльним аналізом поверхонь руйнування.

4. Вперше з використанням методів потенціометрії розкрито вплив передексплуатаційних навантажень на електрохімічну поведінку матеріалу трубопроводу та одержано кінетичні криві електродного потенціалу, які дозволяють судити про кінетику нагромадження корозійно-втомних пошкоджень, починаючи від поверхневих змін, що передують процесу зародження тріщин, до повного руйнування матеріалу морського трубопроводу. Такі дані можуть бути використані для науково обгрунтованого вибору параметрів активного та засобів пасивного захисту матеріалу трубопроводу від корозії, а також прогнозування ресурсу його безпечної експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблену раніше методику дослідження деформації та руйнування морських трубопроводів доповнено моделюванням процесу укладання трубопроводу на дно моря J-методом.
2. Для основного металу та зварного з'єднання трубопроводу одержано аналітичні залежності для розрахунку коефіцієнтів зменшення довговічності з урахуванням передексплуатаційних навантажень та коефіцієнтів впливу агресивності середовища на довговічність.
3. Побудовано діаграми для оцінки впливу передексплуатаційних навантажень на відносний ресурс безпечної експлуатації основного металу та зварного з'єднання морського трубопроводу.
4. Розроблено та впроваджено на підприємствах ДАТ “Чорноморнафтогаз” та ТОВ “Інститут “Шельф” “Методику оцінки впливу передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S-методом на його ресурс безпечної експлуатації”.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи одержані автором самостійно. Роботи [1-4] опубліковані без співавторів. В роботі [5] автором здійснено постановку експерименту, узагальнення та первинний аналіз результатів експерименту. В роботі [6] автором проведено критичний аналіз основних способів укладання морських трубопроводів та обгрунтовано актуальність теоретико-експериментальних досліджень впливу способу укладання трубопроводу на його проектний ресурс безпечної експлуатації, в роботах [7, 8] – запропоновані оптимальні математичні моделі розрахунку НДС при укладанні трубопроводів S- та J-методами, а в роботах [9, 10] – здійснена наукова інтерпретація кривих втоми та корозійної втоми, кінетичних кривих деформації та діаграм циклічного кругового згину. В роботах [11, 12] автору належать ідея підходу та інтерпретація одержаних результатів. В роботі [13] автором побудовані експериментальні і прийняті діаграми одноциклового знакозмінного згину та введено поняття “відносний ресурс безпечної експлуатації” трубопроводу.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися на X, XI Міжнародних конференціях-виставках “Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів” (м. Львів, 2010, 2012), II Міжнародній науково-технічній конференції “Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” (м. Тернопіль, 2011), IV Международной

конференції “Деформація и разрушение материалов и наноматериалов” (г. Москва, 2011), Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу” (м. Івано-Франківськ, 2012), Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених та студентів “Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії – 2012” (м. Івано-Франківськ, 2012).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць, з них 9 у фахових журналах України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури (144 найменування) та 2 додатків. Викладена на 169 сторінках машинописного тексту, містить 85 рисунків та 16 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 трубопровідного транспорту, пояснюється специфіка взаємодії морського середовища з трубопроводом в процесі експлуатації, зумовлена варіаціями навантажень і впливів на несучі елементи, та пов'язані з цим проблеми, які постають при проектування морських трубопроводів. Проблемами проектування, будівництва та експлуатації морських трубопроводів займалися такі вчені, як Шадрін О. Б., Капустін К. Я., Бородавкін П. П., Горяїнов Ю. А., Грудницький Г. В., Ільницький М. К., Кравцов В. І., Kyriakides S., Крижанівський С.І. та ін. У їхніх працях розглядаються проблеми вибору траси, способу укладання, матеріалу труб, захисного покриття, системи електрозахисту, проведення зварювальних та монтажних робіт, визначення та аналізу конфігурації і НДС трубопроводу під час будівництва, а також забезпечення міцності та стійкості початкової форми рівноваги циліндричної оболонки трубопроводу з урахуванням впливу підводних течій в процесі експлуатації. Проте, при виборі способу укладання морських трубопроводів крім таких факторів, як геометричні розміри трубопроводу, глибина його укладання, вид баржі-трубоукладача та вартість будівництва, також необхідно враховувати деформаційні ефекти, викликані зміною його НДС при укладанні. Вони визначатимуть ризик виникнення аварійних ситуацій, наслідком яких можуть бути значні економічні втрати на ремонт та заміну пошкодженої ділянки трубопроводу. Однак, системного вивчення впливу передексплуатаційних навантажень в процесі укладання S- та J-методами на опір втомі, корозійній втомі та ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів не проводилося.

Проведено порівняльний аналіз найбільш поширених методів укладання морських трубопроводів на дно моря. Розглянуто основні переваги та недоліки кожного з методів. Показано, що урахування навантажень та впливів на несучі елементи трубопроводу в процесі укладання дасть змогу підвищити якість прогнозування ресурсу його безпечної експлуатації. Проведено критичний аналіз математичних моделей для розрахунку НДС конструкції трубопроводу при його укладанні на дно моря S- та J-методами. Показано, що задачу динамічного розрахунку морських трубопроводів при укладанні з урахуванням коливань судна з незначною

похибкою для результатів розрахунків можна звести до статичної задачі про поздовжній згин трубопроводу, а дію динамічного навантаження прирівняти до дії еквівалентного статичного навантаження. Тобто задача про об'ємний напружений стан зводиться до задачі про плоский напружений стан трубопроводу. Розглянуто основні причини корозійного руйнування морських трубопроводів та методи його запобігання. Показано, що для морських трубопроводів найбільш небезпечним є синергічна дія мало- та багатоциклових низькочастотних навантажень і корозійного впливу середовища.

У другому розділі описано об'єкти і методи досліджень. Розроблену раніше методику дослідження деформації та руйнування морських трубопроводів доповнено моделюванням процесу укладання трубопроводу на дно моря J-методом.

Створено методику оцінки впливу передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу на його ресурс безпечної експлуатації, яка була реалізована наступним чином. Втомним випробовуванням передувало моделювання процесу укладання трубопроводу S- та J-методами з метою виявлення впливу попереднього квазістатичного навантаження в циклі укладання на деформаційну поведінку матеріалу трубопроводу в процесі експлуатації. Моделювання процесу укладання трубопроводу S-методом відбувалося шляхом одноциклового знакозмінного навантаження зразків, що на діаграмі згину призводить до утворення петлі механічного гістерезису, яка складається з двох півциклів. Моделюванню процесу укладання трубопроводу J-методом відповідав перший півцикл навантаження, якому піддавались зразки при моделюванні процесу його укладання S-методом. При збільшенні чи зменшенні навантаження на один ступінь номінальні напруження змінювалися на величину $\Delta\sigma = 20$ МПа. Час витримки t на кожному ступені розраховувався залежно від рівня номінальних напружень та способу укладання з урахуванням того, що довжина укладеного трубопроводу за цикл навантаження, відповідно до літературних даних, приймається рівною $L = 300$ м, а швидкість укладання $V = 3$ км/доб.

Моделювання передексплуатаційного навантаження (переднавантаження) в процесі укладання трубопроводу проводили винятково у середовищі повітря. Пошкодженням ізоляційного покриття в циклі укладання нехтували. Після проведення моделювання переднавантаження зразок витримувався розвантаженим не менше 12 годин для максимальної релаксації напружень.

Для оцінки довговічності матеріалів та конструкцій найчастіше використовують ділянки кривих втоми (рис. 1, а, крива 2) та корозійної втоми (рис. 1, б, крива 2) в напівлогарифмічних координатах. При цьому ділянка кривої корозійної втоми знаходиться лівіше ділянки втоми на повітрі. Точка перетину цих ділянок лежить на границі між областями циклічної повзучості та втомного зламу. Якщо крива втоми після досягнення певного числа циклів навантаження N_R характеризується виходом на горизонтальну ділянку, якій відповідає границя витривалості σ_R , то крива корозійної втоми в міру збільшення числа циклів навантаження безперервно спадає і характеризується наявністю умовної границі витривалості $\sigma_{Rкор}$ при заданій базі випробувань $N_{Rкор}$. Для врахування впливу переднавантаження на довговічність сталі трубопроводу необхідно доповнити дану інформацію відповідними результатами для

переднавантаженого матеріалу (рис. 1, а, б, криві 1). Виділена область відповідає зменшенню довговічності внаслідок передексплуатаційних навантажень.

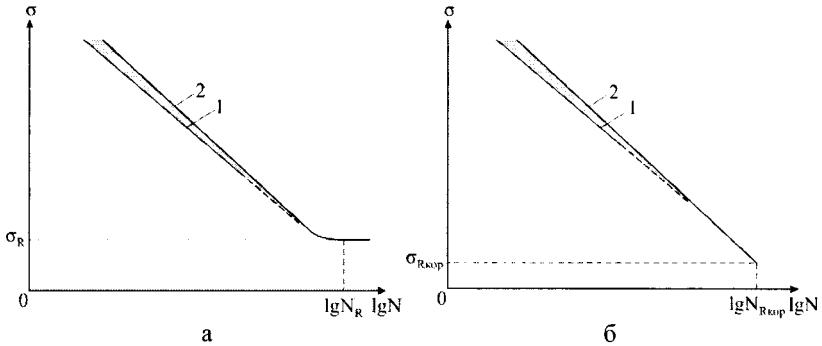


Рис. 1. Схематичне зображення кривих втоми (а) та корозійної втоми (б) матеріалу трубопроводу з урахуванням передексплуатаційного навантаження (1) та без нього (2)

Відомо, що деформаційна поведінка матеріалу трубопроводу в процесі циклічного навантаження описується кінетичними кривими, загальний вигляд яких зображений на рис. 2, а. З метою простішого визначення впливу передексплуатаційних навантажень на зменшення довговічності пропонується по осі абсцис замість абсолютних значень довговічності N використовувати відносні $- N_i / N$, де N_i – кількість пройдених циклів навантаження (рис. 2, б).

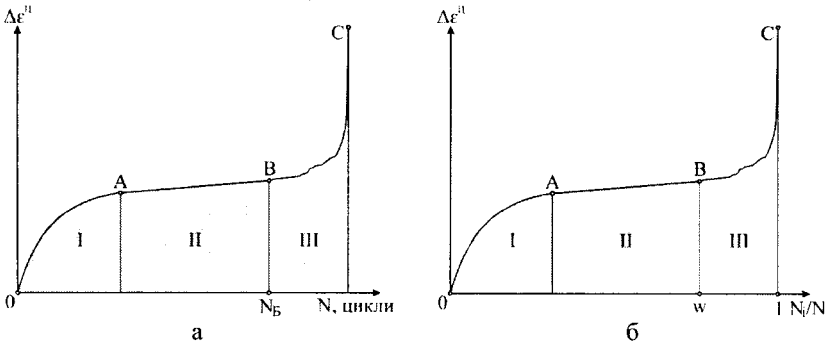


Рис. 2. Загальний вигляд кінетичних кривих деформації при циклічному навантаженні

Для матеріалу трубопроводу типовою є тристадійна кінетика деформування з характерним інтенсивним циклічним зменшенням на I стадії (ділянка OA), яке носить затухаючий характер. Найтривалішій II стадії (ділянка AB) відповідає відносна стабілізація амплітуди циклічної деформації $\Delta \varepsilon^{II}$, яка монотонно зростає з постійною, проте незначною швидкістю. Наприкінці даної стадії в структурі металу трубопроводу накопичується критичний ступінь пошкоджуваності (відбувається зародження мікротріщин). Подальше циклічне деформування на завершальній III стадії пов'язане з прискореним ростом втомних тріщин, формуванням та поширенням магістральної тріщини аж до початку остаточного руйнування зразка. Таким чином, протягом III-ї

стадії штатна експлуатація трубопроводу є неможливою, оскільки вона може призвести до виникнення аварійної ситуації, і, відповідно, включати її тривалість в загальний ресурс роботи трубопроводу є недостньо коректним. Тому суму тривалостей I та II стадій запропоновано вважати ресурсом безпечної експлуатації N_B , а суму відносних тривалостей I та II стадій – відносним ресурсом безпечної експлуатації w (рис. 3). Виділена область відповідає зменшенню відносного ресурсу безпечної експлуатації внаслідок передексплуатаційних навантажень.

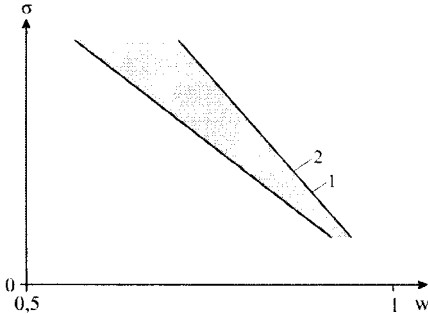


Рис. 3. Характер залежності відносного ресурсу безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу з переднавантаженням (1) та без нього (2) від рівня напружень

Експериментальна перевірка методики виявила, що введення оцінки ресурсу роботи у відносних величинах дає змогу нівелювати вплив розкиду довговічностей зразків і пов'язаних з цим похибок розрахунку в межах одного рівня напружень. Так, при рівні напружень 260 МПа розкид результатів по довговічності складав 20-30 %, в той час як значення відносного ресурсу безпечної експлуатації відрізнялися приблизно на порядок менше. Основні чинники, які спричинюють розкид результатів за довговічністю (різниця в механообробці труб, партіях поставки, відмінностях технологій виготовлення труб різних заводів-виробників тощо), не впливають на загальні закономірності процесу деформації та руйнування матеріалу, зокрема на його стадійність. У зразках з більшою абсолютною довговічністю фіксується нижчий рівень амплітуди циклічної деформації на II-ій стадії та швидкість її зміни на I-ій стадії, проте сумарна відносна тривалість стадій залишається практично незмінною для всіх зразків, які піддавались випробуванню за однакової амплітуди напружень та однакових умов навантаження. Таким чином, запропонований параметр відносної довговічності дає змогу проводити порівняльний аналіз труб однієї марки сталі для різних виробників та оптимізувати їх вибір для будівництва трубопроводів не лише за стандартними фізико-механічними характеристиками, а й з урахуванням майбутніх передексплуатаційних та експлуатаційних навантажень.

Криві втоми дозволяють визначити коефіцієнт зменшення довговічності матеріалу трубопроводу з урахуванням передексплуатаційних навантажень:

$$K_{1J} = \frac{N_J}{N}, K_{1S} = \frac{N_S}{N}, \quad (1)$$

де K_{1J} та K_{1S} – коефіцієнти зменшення довговічності з урахуванням передексплуатаційних навантажень для J- та S-методу відповідно; N_J , N_S та N – довговічність матеріалу трубопроводу з переднавантаженням J- і S-методом та без нього відповідно.

Таким чином, ресурс експлуатації матеріалу трубопроводу з урахуванням передексплуатаційних навантажень буде визначатися за формулою:

$$P_J = K_{1J}P, P_S = K_{1S}P, \quad (2)$$

де P_J та P_S – ресурс експлуатації матеріалу трубопроводу з урахуванням передексплуатаційних навантажень для J- та S-методу відповідно;
 P – проектний ресурс роботи морського трубопроводу.

Відповідно, ресурс безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу з урахуванням передексплуатаційних навантажень та без нього буде визначатися за формулами:

$$PB_S = K_{1S}w_S P, PB_S = K_{1S}w_S P, PB = wP, \quad (3)$$

де PB_J , PB_S та PB – ресурс безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу з урахуванням передексплуатаційних навантажень для J- і S-методу та без нього відповідно.

w_J , w_S та w – відносний ресурс безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу з переднавантаженням J- і S-методом та без нього відповідно.

Криві корозійної втоми дозволяють визначити коефіцієнти впливу агресивності середовища на довговічність матеріалу трубопроводу:

$$K_2 = \frac{N^k}{N}, K_{2J} = \frac{N_S^k}{N_S}, K_{2S} = \frac{N_S^k}{N_S}, \quad (4)$$

де K_{2J} , K_{2S} та K_2 – коефіцієнти впливу агресивності середовища на довговічність матеріалу трубопроводу з переднавантаженням J- і S-методом та без нього в середовищі морської води відповідно;

N_J^k , N_S^k та N^k – довговічність матеріалу трубопроводу з переднавантаженням J- і S-методом та без нього в середовищі морської води відповідно.

Таким чином, ресурс експлуатації матеріалу трубопроводу з пошкодженням ізоляційним покриттям з урахуванням передексплуатаційних навантажень та без нього буде визначатися за формулами:

$$P_J^k = K_{1J}K_{2J}P, P_S^k = K_{1S}K_{2S}P, P^k = K_2P, \quad (5)$$

де P_J^k , P_S^k та P^k – ресурс експлуатації матеріалу трубопроводу з пошкодженням ізоляційним покриттям з урахуванням передексплуатаційних навантажень для J- і S-методу та без нього відповідно.

Відповідно, ресурс безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу з пошкодженням ізоляційним покриттям з урахуванням передексплуатаційних навантажень та без нього буде визначатися за формулами:

$$PB_J^k = K_{1J}K_{2J}w_J^k P, PB_S^k = K_{1S}K_{2S}w_S^k P, PB^k = K_2w^k P, \quad (6)$$

де PB_J^k , PB_S^k та PB^k – ресурс безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу з пошкодженням ізоляційним покриттям з урахуванням передексплуатаційних навантажень для J- і S-методу та без нього відповідно.

w_J^k , w_S^k та w^k – відносний ресурс безпечної експлуатації матеріалу трубопроводу з переднавантаженням J- і S-методом та без нього в середовищі морської води відповідно.

Оптимальним способом апроксимації кривих втоми та корозійної втоми, побудованих в напівлогарифмічних координатах, є показникова функція виду $N(\sigma) = 10^{a\sigma + b}$, де a і b – коефіцієнти, які визначаються на основі результатів втомних та корозійно-втомних випробувань. Для оцінки впливу переднавантаження на відносний ресурс безпечної експлуатації доцільно використовувати лінійну залежність типу $\ln(\sigma) = a\sigma + b$. Дані залежності дають змогу відразу розраховувати довговічність та відносний ресурс безпечної експлуатації, використовуючи задане значення амплітуди напружень в МПа.

Таким чином, розроблена методика дає змогу за результатами модельних експериментів оцінити вплив передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на ресурс безпечної експлуатації морських нафтогазопроводів.

У третьому розділі досліджується вплив передексплуатаційного навантаження на деформаційну поведінку, довговічність та ресурс безпечної експлуатації основного металу та зварного з'єднання морських газонафтопроводів при навантаженні на повітрі, яке відповідає експлуатації трубопроводу з цілісним ізоляційним покриттям.

Вивчено вплив передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на фізико-механічні характеристики матеріалу трубопроводу при ступінчастому навантаженні чистим згином. Зафіксовано негативний вплив одноциклового переднавантаження при рівні номінальних напружень, нижчому за границю текучості. Показано, що переднавантаження S-методом внаслідок прояву квазістатичного ефекту Баушінгера зменшує рівень границі текучості трубної сталі 09Г2С до 42 %, а зварного з'єднання – до 50 %, що необхідно враховувати в інженерних розрахунках на стадіях проектування та експлуатації. Підтверджено можливість ранжирування матеріалів за рівнем нагромаджених пошкоджень з допомогою силового та деформаційного критерію ефекту Баушінгера для оптимізації вибору матеріалу при спорудженні морських трубопроводів.

Вперше побудовано криві низькочастотної втоми основного металу (рис. 4, а) та зварного з'єднання (рис. 4, б) трубопроводу з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S- і J-методом та без нього. Як бачимо, переднавантаження знижує загальну довговічність матеріалу трубопроводу, причому негативний вплив переднавантаження із збільшенням рівня номінальних напружень посилюється. Крім того, переднавантаження більш суттєво знижує загальну довговічність зварного з'єднання порівняно з основним металом трубопроводу (рис. 5). Така тенденція підтверджує тезу про найбільший ризик виникнення пошкоджень, відмов чи позаштатних ситуацій під час експлуатації трубопроводу саме в області зварного шва. При цьому, границя витривалості зварного з'єднання на базі 10^6 циклів складає $\sigma_{-1} = 170$ МПа, а границя витривалості сталі 09Г2С на базі 10^6 циклів дещо більша від такої для зварного з'єднання і складає $\sigma_{-1} = 180$ МПа.

Криві втоми трубних сталей не розкривають стадійності цього складного процесу, тому нами було здійснено комп'ютерну реєстрацію кінетики деформації при низькочастотному (0,8 Гц) навантаженні. За результатами досліджень одержано кінетичні криві деформації зразків-моделей сталі 09Г2С з переднавантаженням S- і J-методом та без нього і в об'єднаному вигляді (рис. 6). Для всіх досліджуваних амплітуд напружень σ_a фіксуємо істотні зміни у кінетиці деформації

переднавантажених зразків. Зокрема, спостерігається небезпечна тенденція – зменшення ресурсу безпечної експлуатації трубопроводу, який відповідає I та II стадіям низькочастотної втоми, причому негативний вплив переднавантаження із збільшенням рівня номінальних напружень посилюється. Крім того, при укладанні трубопроводу S-методом в порівнянні з J-методом цей вплив більш відчутний, оскільки відбувається істотна зміна фізико-механічних характеристик сталі трубопроводу, порівняно з вихідним станом, внаслідок прояву квазістатичного ефекту Баушінгера.

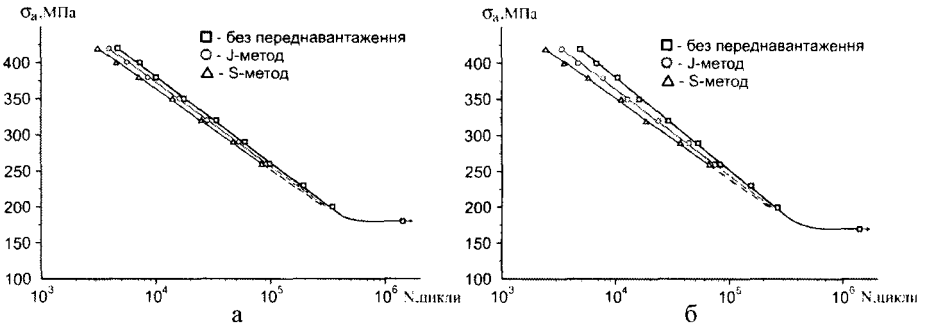


Рис. 4. Криві низькочастотної втоми сталі 09Г2С (а) та зварного з'єднання (б) трубопроводу з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S- та J-методом та без нього

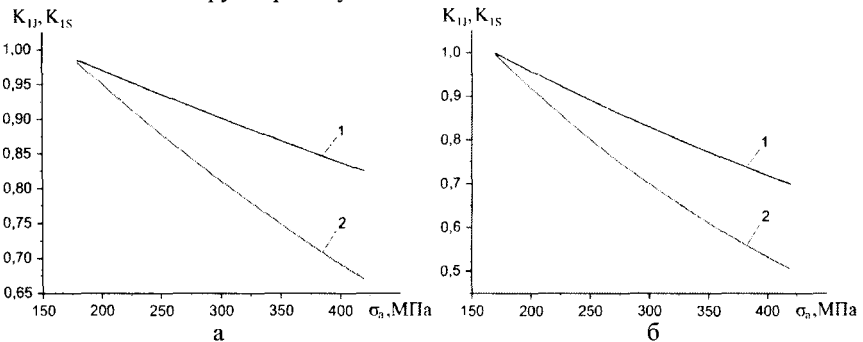


Рис. 5. Залежність коефіцієнтів зменшення довговічності K_{IJ} (1) та K_{IS} (2) від рівня номінальних напружень для сталі 09Г2С (а) та зварного з'єднання (б)

Порівняння вигляду поверхонь руйнування (рис. 7) свідчить про зменшення їх рельєфності у переднавантажених зразках, що однозначно вказує на зміни в механізмі руйнування, а саме, у збільшенні частки крихкого руйнування. Така поведінка матеріалу трубопроводу призведе до підвищення ризиків руйнування у разі виникнення дефекту, а також зменшить живучість системи вцілому, тому потребує урахування як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації, особливо на пізній її стадії.

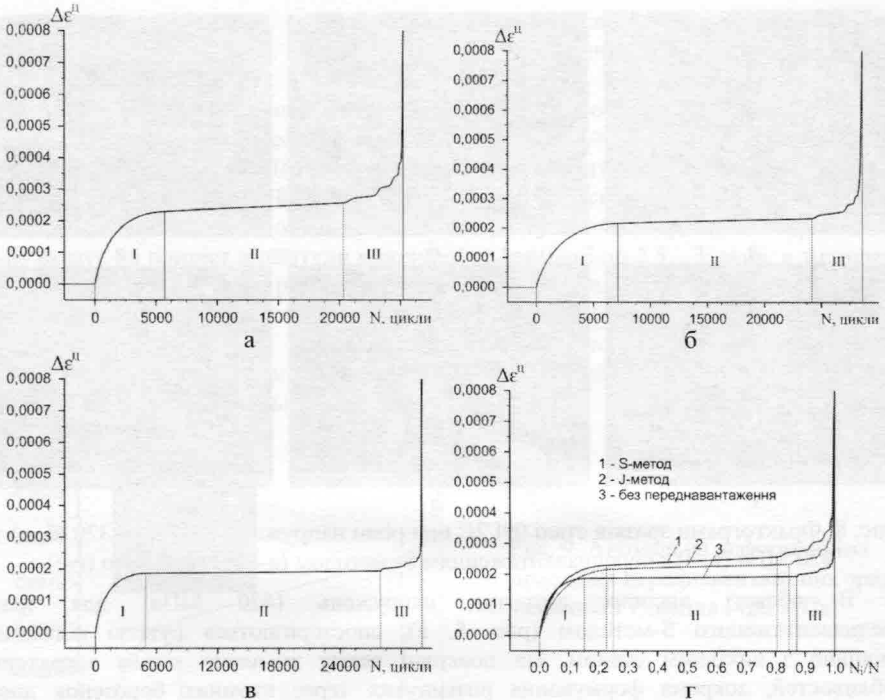


Рис. 6. Кінетика амплітуди циклічної деформації сталі 09Г2С при рівні напружень 320 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г)

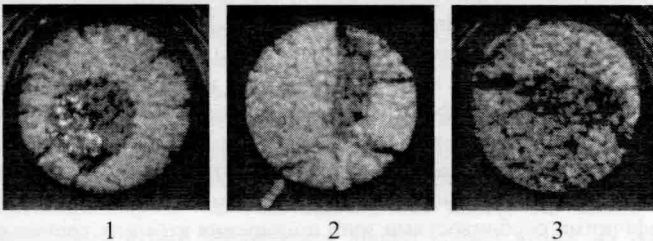


Рис. 7. Макробудова зламів зразків сталі 09Г2С при рівні напружень 320 МПа з переднавантаженням S- (1), J-методом (2) та без нього (3)

За результатами фрактографічних досліджень (рис. 8) було виявлено, що передексплуатаційне навантаження матеріалу трубопроводу може формувати в ньому структуру, схильну до декогезії, тобто розшарувань матеріалу в площині прокатування. Подібне розшарування виявлено на поверхні руйнування частини зразків кожної з партій. Їх утворенню сприяють частинки вторинних фаз – сульфідів заліза та марганцю. Негативно впливатиме на стан такого матеріалу і можлива наявність водню в продукті, що транспортується трубопроводом, оскільки відомо, що атомарний водень має властивість накопичуватись в зонах концентрації напружень.

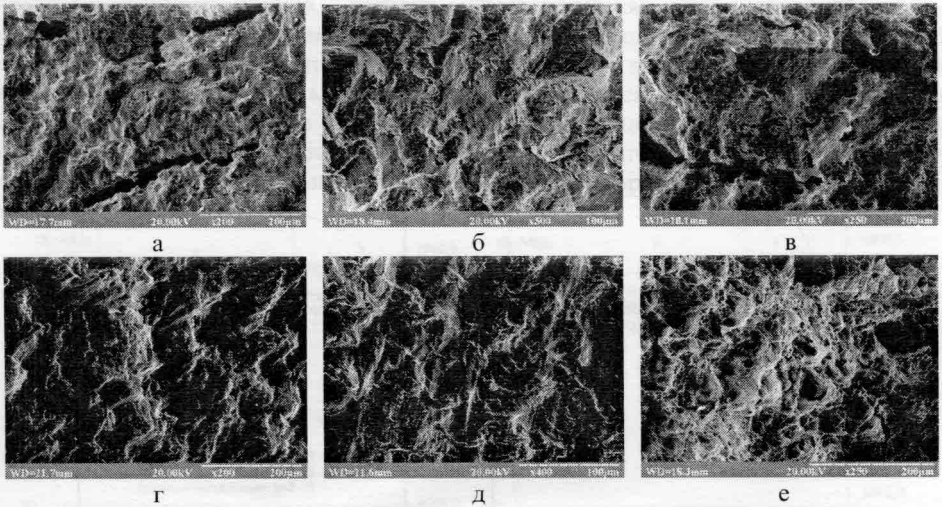


Рис. 8. Фрактограми зразків сталі 09Г2С при рівні напружень 260 (а, г), 320 (б, д) та 420 МПа (в, е) з переднавантаженням S- методом (а-в) та без нього (г-е)

В області високих амплітуд напружень (420 МПа) для зразка, переднавантаженого S-методом (рис. 8, в), спостерігаються суттєві відмінності порівняно з вихідним станом. На поверхні зламу виявлено кілька характерних особливостей, зокрема формування розвинutih терас втомних борозенок досить великого розміру. Фрагменти борозенкового рельєфу оточені пластично деформованими ділянками, що дозволяє тлумачити даний механізм руйнування як змішаний. На рис. 8, в подано зображення перехідної зони, на якій відбувається зміна механізму руйнування із втомного (зсувного) до механізму ямкового відриву. В пружнопластичній області при зниженні рівня напружень до 320 МПа розвиток тріщин для зразка, переднавантаженого S-методом (рис. 8, б), носить виражено неоднорідний характер, що свідчить про неодночасність їх виникнення. Такий характер поширення тріщин проявляється у формуванні розвиненого рельєфу, яке на макрорівні відбувається за змішаним крихко-в'язким механізмом. В пружній області при рівні напружень 260 МПа (рис. 8, а) для пережнавантаженого матеріалу відбувається розвиток тріщин розшарування за механізмом квазісколювання. Основними мікрофрактографічними особливостями зони поширення втомних тріщин є в'язкі ділянки, сформовані шляхом руйнування перемичок та деформаційного ковзання, а також плоскі лускоподібні фасетки, вкриті короткими втомними борозенками з кроком, який не перевищує десятих мікрона. Подібні фасетки формуються переважно за умови впливу досить великих амплітуд навантаження, що вказує на негативний вплив передексплуатаційних навантажень на втомну довговічність навіть в області напружень нижче границі текучості.

Зафіксована деформаційна поведінка зразків зварного з'єднання загалом відповідає такій для сталі трубопроводу, оскільки кінетика деформації теж демонструє три характерні стадії, однак їх тривалість у відсотках дещо відрізняється. Зокрема,

збільшується, порівняно з основним металом, тривалість третьої стадії, що, як наслідок, призводить до більш інтенсивного зменшення ресурсу безпечної експлуатації.

В процесі втомних випробувань зразків зварного з'єднання виявилася досить небезпечна тенденція: зафіксовано аномальну деформаційну поведінку частини зразків з кожної партії (рис. 9). Вона проявляється у відсутності стабілізації амплітуди циклічної деформації на II-ій стадії, внаслідок чого практично від самого початку II-ї стадії зразки переходять в область швидкого росту втомної тріщини. Порівняльний аналіз вказує на приріст амплітуди циклічної деформації до 2,5...3 разів, а зменшення загальної довговічності та ресурсу безпечної експлуатації становить 1,8...2,3 рази. Причому, така поведінка спостерігається тільки у переднавантажених S- та J-методом зразків, що зайвий раз підтверджує неприпустимість нехтування впливом передексплуатаційних навантажень при оцінці загального ресурсу та ресурсу безпечної експлуатації морських трубопроводів.

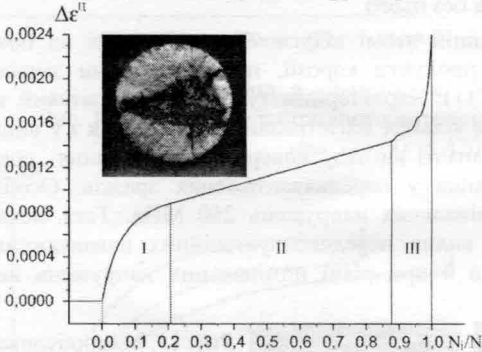


Рис. 9. Аномальна деформаційна поведінка переднавантажених зразків зварного з'єднання (420 МПа)

У четвертому розділі вивчається вплив передексплуатаційних навантажень на деформаційну поведінку, довговічність та ресурс безпечної експлуатації, а також кінетику електродного потенціалу (ЕП) основного металу та зварного з'єднання у середовищі морської води, що відповідає імітації роботи трубопроводу з пошкодженим ізоляційним покриттям.

За результатами корозійно-втомних досліджень вперше побудовано криві втоми основного металу (рис. 10, а) та зварного з'єднання (рис. 10, б) трубопроводу в морській воді з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S- та J-методом і без нього. Як видно з рис.10, ділянки кривих корозійної втоми знаходяться лівіше кривої втоми на повітрі, а точка їх перетину лежить на границі між областями циклічної повзучості та втомного зламу, якій відповідає 420 МПа. При зниженні σ_a від 420 МПа довговічність сталі в корозійному середовищі, у порівнянні з повітрям, закономірно зменшується. При цьому, умовна границя корозійної витривалості сталі 09Г2С на базі 10^6 циклів складає $\sigma_{-1k}=90$ МПа, а умовна границя корозійної витривалості зварного з'єднання на базі 10^6 циклів дещо менша від такої для основного металу і складає $\sigma_{-1k}=80$ МПа.

На основі рівнянь, одержаних за результатами втомних та корозійно-втомних досліджень визначено коефіцієнти впливу агресивності середовища на довговічність основного металу та зварного з'єднання трубопроводу.

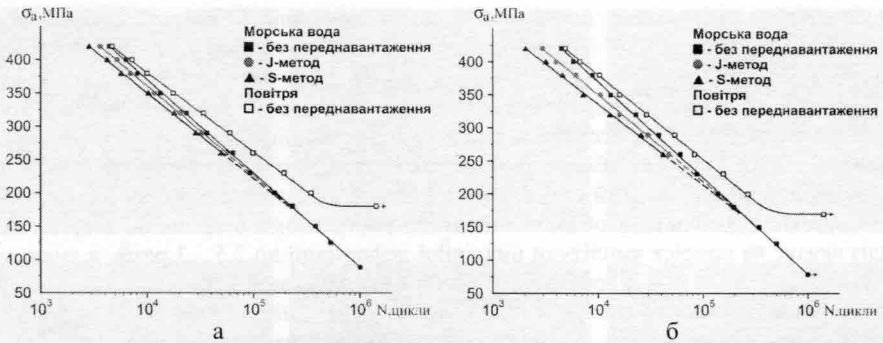


Рис. 10. Взаємне розташування ділянок кривих низькочастотної втоми та корозійної втоми сталі 09Г2С (а) та зварного з'єднання (б) з переднавантаженням S- і J-методом та без нього

Макробудова зламів при корозійній втомі відрізняється від такої на повітрі, оскільки на неї суттєво впливають продукти корозії, перешкоджаючи змиканню берегів тріщини в циклі стиску (рис. 11). Характерним тут є багатопатевий злам, пов'язаний з паралельним поширенням кількох магістральних тріщин. Як і у випадку випробовувань на повітрі, детальний аналіз вигляду поверхонь руйнування показує збільшення частки крихкого руйнування у переднавантажених зразків. Особливо наочним цей процес є при рівні номінальних напружень 260 МПа. Така механіка руйнування підтверджує негативний вплив передексплуатаційних навантажень не тільки у високоамплітудній області, а й при рівні номінальних напружень нижче границі текучості.

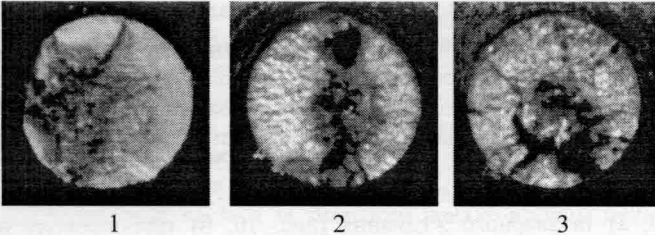


Рис. 11. Макробудова зламів зразків зварного з'єднання при рівні напружень 260 МПа з переднавантаженням S- (1), J-методом (2) та без нього (3) у морській воді

Вивчення електрохімічних властивостей матеріалу трубопроводу при корозійній втомі, встановлення взаємозв'язку між характером зміни електрохімічних властивостей та накопиченням корозійно-втомних пошкоджень дають важливу інформацію про кінетику та механізм процесу руйнування. За кінетичними кривими електродного потенціалу можна судити про кінетику накопичення корозійно-втомних пошкоджень, починаючи від поверхневих змін, що передують процесу зародження тріщини, до повного руйнування зразка. В ході досліджень одержано кінетичні криві електродного потенціалу для трубної сталі 09Г2С (рис. 12) та зварного з'єднання (рис. 13) трубопроводу в морській воді з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S- та J-методом та без нього. Досліджено стадійність кінетики ЕП основного металу та зварного з'єднання трубопроводу при статичному і низькочастотному навантаженні та показано, що переднавантаження істотно

інтенсифікує процес розблагородження електродного потенціалу матеріалу трубопроводу та зменшує його рівноважне значення, що підвищує ризик утворення та розвитку корозійних уражень в умовах пошкодженого ізоляційного покриття.

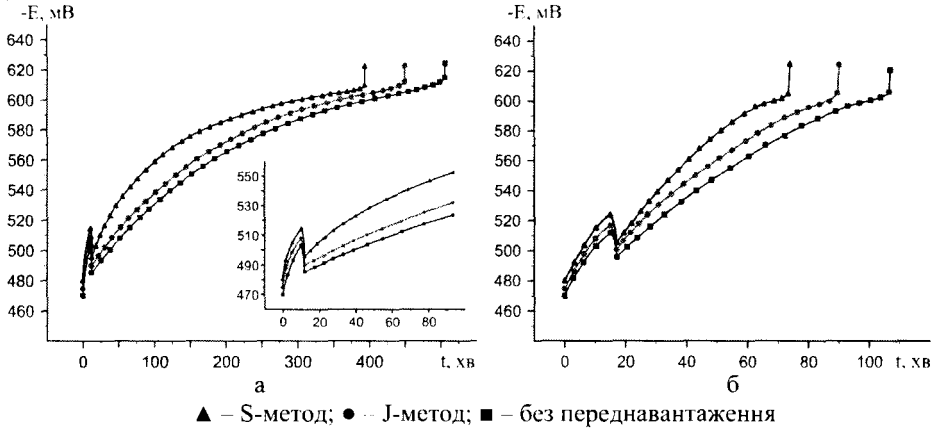


Рис. 12. Кінетика електродного потенціалу сталі 09Г2С у морській воді при 320 (а) та 420 (б) МПа

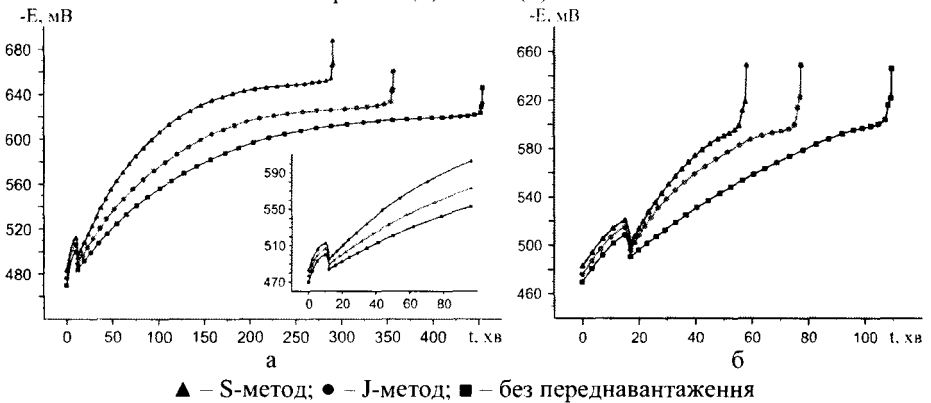


Рис. 13. Кінетика електродного потенціалу зварного з'єднання у морській воді при 320 (а) та 420 (б) МПа

Для основного металу величина ЕП початку руйнування при всіх рівнях номінальних напружень практично однакова, хоча й має тенденцію до незначного зниження зі зменшенням амплітуди напружень, а для переднавантажених зразків вона є навіть дещо вищою, що може бути пов'язано з фактором часу. Зварне з'єднання порівняно з основним металом характеризується помітно вищою інтенсивністю розблагородження та відповідно нижчим значенням ЕП початку руйнування, особливо це стосується переднавантажених зразків. Якщо величина ЕП початку руйнування зразків без переднавантаження є практично однаковою для всіх досліджуваних рівнів номінальних напружень, то для переднавантажених зразків, за винятком навантаження

при амплітуді 420 МПа, вона навпаки відчутно зменшується. Так, при 320 МПа різниця ЕП для зразків, переднавантажених S-методом (рис. 13, а), порівняно зі звичайним навантаженням досягає 40-50 мВ, що свідчить про значний рівень нагромаджених поверхневих корозійних дефектів. З наближенням до області пружних деформацій механічна активація корозійних процесів дещо втрачає інтенсивність, однак продовжує відігравати відчутну роль через прояв ефекту Ребіндера та наявність локального мікропластичного течіння навіть у межах границі пружності.

Крім того, в пружнопластичній зоні для зварного з'єднання перед доломом впродовж останніх ~100-150 циклів спостерігається стрибкоподібне спадання ЕП внаслідок прискореного росту та одночасного поширення кількох магістральних тріщин, про що свідчить утворення багатолопатевого зламу, яке може бути пов'язане з гетерогенною структурою зварного з'єднання. Така гіпотеза підтверджується кінетикою деформації зразків та більшим стрибком ЕП на стадії долому порівняно з основним металом.

ВИСНОВКИ

1. Розроблену раніше методику дослідження деформації та руйнування морських трубопроводів доповнено моделюванням процесу укладання трубопроводу на дно моря J-методом. Створено та впроваджено на підприємствах ДАТ “Чорноморнафтогаз” та ТОВ “Інститут “Шельф” методику оцінки впливу передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу на його ресурс безпечної експлуатації.
2. Вивчено вплив передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на фізико-механічні характеристики матеріалу трубопроводу. Показано, що переднавантаження S-методом, внаслідок прояву квазістатичного ефекту Баушінгера, зменшує рівень границі текучості трубної сталі 09Г2С до 42 %, а зварного з'єднання – до 50 %, що необхідно враховувати в інженерних розрахунках на стадіях проектування та експлуатації. Підтверджено можливість ранжирування матеріалів за рівнем нагромаджених пошкоджень за допомогою силового та деформаційного критеріїв ефекту Баушінгера для оптимізації вибору матеріалу при спорудженні морських трубопроводів.
3. Науково доведено недостатність використання лише показника довговічності для оцінки ресурсу та залишкового ресурсу роботи трубопроводів через неможливість їх експлуатації в штатному режимі на стадії прискореного росту втомних (корозійно-втомних) тріщин, яка складає до 34 % від загальної довговічності для основного металу та до 32 % для зварного з'єднання трубопроводу. Спираючись на об'єднаний аналіз показників довговічності та деформаційної поведінки матеріалу трубопроводу, запропоновано спосіб визначення ресурсу безпечної експлуатації та введено поняття “відносний ресурс безпечної експлуатації” морських трубопроводів, використання якого дає змогу нівелювати вплив розкиду довговічностей зразків і пов'язаних з цим похибок розрахунку в межах одного рівня напружень.
4. Вперше побудовано криві низькочастотної (0,8 Гц) втоми та корозійної втоми зразків зі сталі 09Г2С та зварного з'єднання морського трубопроводу з

- урахуванням переднавантаження за моделлю S- і J-методів укладання та без нього. Показано, що передексплуатаційні навантаження зменшують відносний ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів з цілісним ізоляційним покриттям при укладанні S-методом для основного металу до 9,3 %, для зварного з'єднання – до 7,9 %, а при укладанні J-методом для основного металу – до 3,3 %, для зварного з'єднання – до 4,1 %. Також показано, що передексплуатаційні навантаження зменшують відносний ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів з пошкодженням ізоляційним покриттям при укладанні S-методом для основного металу до 9,1 %, для зварного з'єднання – до 8,7 %, а при укладанні J-методом для основного металу – до 3,6 %, для зварного з'єднання – від 4,9 %.
5. Вивчено кінетику електродного потенціалу зразків основного металу та зварного з'єднання морського трубопроводу з урахуванням переднавантаження за моделлю S- та J-методів укладання і без нього при низькочастотному навантаженні у морській воді і показано, що в області експлуатаційних навантажень електродний потенціал дає змогу відслідковувати процес нагромадження пошкоджень у матеріалі трубопроводу.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Пиріг Т. Ю. Вплив передексплуатаційних навантажень на ресурс роботи морських трубопроводів / Т. Ю. Пиріг // Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу: матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 15-18 травня 2012 р. / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 231-233.
2. Пиріг Т. Ю. Оцінка ресурсу безпечної експлуатації морських трубопроводів з урахуванням навантажень у процесі будівництва / Т. Ю. Пиріг // Фізико-хімічна механіка матеріалів, спец. вип. № 9. – 2012. – Т.2. – С. 677-682.
3. Пиріг Т. Ю. Кінетика електродного потенціалу сталі трубопроводів / Т. Ю. Пиріг // *Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії-2012: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів, 5-7 листопада 2012 р.* / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 202-205.
4. Пиріг Т. Ю. Кінетика електродного потенціалу матеріалу зварного з'єднання морських трубопроводів / Т. Ю. Пиріг // *Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії-2012: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів, 5-7 листопада 2012 р.* / Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2012. – С. 205-208.
5. Побережний Л. Я. Вплив йонної сили ґрунтового електроліту на швидкість корозії металу нафтогазопроводів / Л. Я. Побережний, Т. Ю. Пиріг, А. І. Станецький // *Фізико-хімічна механіка матеріалів, спец. вип. № 8.* – 2010. – Т. 2. – С. 620-624.
6. Побережний Л. Я. Способи укладання морських нафтогазопроводів: переваги та недоліки / Л. Я. Побережний, Т. Ю. Пиріг // *Нафтова і газова промисловість.* – 2010. – № 4. – С. 42-45.

7. Побережний Л. Я. Напружено-деформований стан трубопроводів під час їх укладання на дно моря S- та J-методами / Л. Я. Побережний, Т. Ю. Пиріг // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. – № 3(25). – С. 91-96.
8. Побережний Л. Я. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния морских трубопроводов при их укладке / Л. Я. Побережний, Т. Ю. Пыриг // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: IV международная конференция, 25-28 октября 2011 г. / Сборник материалов. – М: ИМЕТ РАН, 2011. – С. 785-787.
9. Побережний Л. Я. Втомна довговічність та кінетика деформації матеріалу трубопроводу при низькочастотному навантаженні / Л. Я. Побережний, Т. Ю. Пиріг // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 3(44). – С. 87-96.
10. Побережний Л. Я. Кінетика деформації і руйнування основного металу та зварного з'єднання трубопроводу у морській воді / Л. Я. Побережний, Т. Ю. Пиріг, І. Б. Окіпний, В. Б. Асатрян // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. – № 1(46). – С. 122-133.
11. Побережний Л. Я. Методика визначення областей підвищеної корозійної активності вздовж трас пролягання магістральних газонафтопроводів / Л. Я. Побережний, А. І. Станецький, Т. Ю. Пиріг, О. Д. Мельник // Розвідка та розробка газових та нафтових родовищ. – 2010. – № 4(37). – С. 118-123.
12. Побережний Л. Методика оцінки впливу передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на втомну довговічність та ресурс безпечної експлуатації морських нафтогазопроводів / Л. Побережний, Т. Пиріг, А. Станецький, Ю. Мойсюк // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2013. – №1. – С. 84-95.
13. Побережний Л. Вплив способу укладання на ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів / Л. Побережний, Т. Пиріг // Вісник Тернопільського національного технічного університету, спеціальний випуск, частина 1. – 2011. – С. 101-106.

АНОТАЦІЯ

Пиріг Т.Ю. Вплив передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2013.

Розроблену раніше методику дослідження деформації та руйнування морських трубопроводів доповнено моделюванням процесу укладання трубопроводу на дно моря J-методом. Вивчено вплив передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на фізико-механічні характеристики сталі трубопроводу та показано, що переднавантаження S-методом зменшує рівень границі текучості трубної сталі 09Г2С до 42 %, а зварного з'єднання – до 50 %. Вперше встановлено закономірності впливу передексплуатаційних навантажень та агресивної дії корозивного середовища (морської води) на загальну довговічність та ресурс і відносний ресурс безпечної

експлуатації основного металу і зварного з'єднання морського трубопроводу. Вивчено кінетику електродного потенціалу зразків основного металу та зварного з'єднання морського трубопроводу з урахуванням переднавантаження за моделлю S- та J-методів укладання і без нього при низькочастотному навантаженні у морській воді, яка дає змогу відслідковувати процес нагромадження пошкоджень у матеріалі трубопроводу.

Ключові слова: морські трубопроводи, передексплуатаційне навантаження, корозійна втома, кінетика деформації, поверхня руйнування, відносний ресурс безпечної експлуатації.

АНОТАЦІЯ

Пыриг Т.Ю. Влияние предэксплуатационных нагрузок в процессе укладки на ресурс безопасной эксплуатации морских трубопроводов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2013.

Изучено влияние предэксплуатационных нагрузок в процессе укладки на физико-механические характеристики материала трубопровода. Впервые построены кривые усталости и участки кривых коррозионной усталости для образцов основного металла и сварного соединения морского трубопровода с учетом предэксплуатационных нагрузок по модели S- и J-методов укладки на основании подходов механики разрушения, коррозионного разрушения и прочности материалов. Полученные кривые позволяют определять долговечность материала морского трубопровода с целостным и поврежденным изоляционным покрытием в процессе эксплуатации в зависимости от способа строительства и уровня механических напряжений в процессе укладки. Установлены основные закономерности влияния нагрузок на стадии укладки на деформационное поведение основного металла и сварного соединения морских трубопроводов в процессе эксплуатации путем записи кинетики деформации в режиме реального времени. Научно доказано недостаточность использования только показателя долговечности для оценки ресурса и остаточного ресурса работы трубопроводов из-за невозможности их эксплуатации в штатном режиме на стадии ускоренного роста усталостных (коррозионно-усталостных) трещин. Предложен способ определения ресурса безопасной эксплуатации морских трубопроводов, опираясь на деформационно-кинетическую трактовку процесса. Экспериментально доказано, что оценка ресурса безопасной эксплуатации в относительных величинах позволяет нивелировать влияние разброса долговечности образцов и связанных с этим погрешностей расчета в пределах одного уровня напряжений, на основе чего введено понятие “относительный ресурс безопасной эксплуатации”. Показано увеличение неомогенности и появление дефектности в структуре основного металла и сварного соединения трубопровода вследствие предэксплуатационных нагрузок, которое приводит к существенному уменьшению долговечности и сопротивления деформациям по сравнению с исходным состоянием, что подтверждается сравнительным анализом поверхностей разрушения. Впервые с использованием методов потенциометрии раскрыто влияние предэксплуатационных нагрузок на

электрохимическое поведение материала трубопровода и получены кинетические кривые электродного потенциала, которые позволяют судить о кинетике накопления коррозионно-усталостных повреждений, начиная от поверхностных изменений, предшествующих процессу зарождения трещин, до полного разрушения материала морского трубопровода. Такие данные могут быть использованы для научно обоснованного выбора параметров активного и средств пассивной защиты материала трубопровода от коррозии, а также прогнозирования ресурса его безопасной эксплуатации.

Разработанная ранее методика исследования деформации и разрушения морских трубопроводов дополнена моделированием процесса укладки трубопровода на дно моря J-методом. Для основного металла и сварного соединения трубопровода получены аналитические зависимости для расчета коэффициентов уменьшения долговечности с учетом предэксплуатационных нагрузок и коэффициентов влияния агрессивности среды на долговечность. Построены диаграммы для оценки влияния предэксплуатационных нагрузок на относительный ресурс безопасной эксплуатации основного металла и сварного соединения морского трубопровода. Разработаны и внедрены на предприятиях ГАО “Черноморнефтегаз” и ООО “Институт” Шельф” “Методика оценки влияния предэксплуатационных нагрузок в процессе укладки трубопровода S-методом на его ресурс безопасной эксплуатации”.

Ключевые слова: морские трубопроводы, предэксплуатационная нагрузка, коррозионная усталость, кинетика деформации, поверхность разрушения, относительный ресурс безопасной эксплуатации.

SUMMARY

Pyrig T.Yu. Impact of preoperational loads in the process of laying on resource of safe operation of subsea pipelines. – Manuscript.

The dissertation is aimed at gaining scientific degree of candidate of technical sciences on specialty 05.15.13 – Pipeline transport, oil and gas storage. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2013.

Previously developed deformation and destruction of subsea pipelines research technique is supplemented by modeling the process of laying the pipeline on the seabed by J-lay method. It was investigated the influence of preoperational loads in the process of laying on the physical-mechanical properties of pipeline material and it was shown that preload by S-lay method reduces yield strength of tubular steel 09G2S up to 42 % and for welded joint – up to 50 %. For the first time it was established regularities of influence of preoperational loads and aggressive action of corrosive environment (seawater) on the overall durability and on resource and relative resource of safe operation of the base metal and welded joint of subsea pipeline. It was studied the kinetics of electrode potential for specimens of the base metal and welded joint of subsea pipeline with taking into account preload by S-lay and J-lay methods of installing and without it at low-cycle load in seawater, which allows to monitor the process of the accumulation of damage in the material of the pipeline.

Keywords: subsea pipelines, preoperational load, corrosion fatigue, kinetic of deformation, fracture surface, relative resource of safe operation.