

КІНЕТИКА ДЕФОРМАЦІЇ І РУЙНУВАННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ТА ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБОПРОВОДУ У МОРСЬКІЙ ВОДІ

¹Л.Я. Побережний, ¹Т.Ю. Пиріг, ²І.Б. Окіпний, ¹В.Б. Асатрян

¹ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727173,
e-mail: poberezhny@nimg.edu.ua

²ТНТУ ім. І. Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, тел. (0352) 254964,
e-mail: kaf_zv@tntu.edu.ua

Проведено моделювання процесу укладання трубопроводу *S* та *J*-методами з метою виявлення впливу передексплуатаційного навантаження в циклі укладання на деформаційну поведінку основного металу та зварного з'єднання трубопроводу з пошкодженим ізоляційним покриттям в процесі експлуатації, його корозійно-втомну довговічність та ресурс безпечної експлуатації. За результатами корозійно-втомних випробувань за схемою навантаження чистим згином з частотою навантаження 0,8 Гц побудовано криві низькочастотної корозійної втоми зразків з основного металу та зварного з'єднання морського трубопроводу з переднавантаженням та без нього. Встановлено деякі закономірності впливу рівня механічних напружень та передексплуатаційних навантажень на ресурс та відносний ресурс безпечної експлуатації основного металу та зварного з'єднання трубопроводу у морській воді. Шляхом аналізу макробудови поверхонь зламів показано збільшення негомогенності та появу дефектності в структурі основного металу та зварного з'єднання трубопроводу внаслідок передексплуатаційних навантажень.

Ключові слова: передексплуатаційне навантаження, корозійна втома, довговічність, кінетика амплітуди циклічної деформації, ресурс безпечної експлуатації, відносний ресурс безпечної експлуатації, морські трубопроводи.

Проведено моделирование процесса укладки трубопровода *S* и *J*-методами с целью выявления влияния предэксплуатационной нагрузки в цикле укладки на деформационное поведение основного металла и сварного соединения трубопровода с поврежденным изоляционным покрытием в процессе эксплуатации, его коррозионно-усталостную долговечность и ресурс безопасной эксплуатации. По результатам коррозионно-усталостных испытаний по схеме нагрузки чистым изгибом с частотой нагрузки 0,8 Гц построены кривые низкочастотной коррозионной усталости образцов из основного металла и сварного соединения морского трубопровода с преднагрузкой и без нее. Установлены некоторые закономерности влияния уровня механических напряжений и предэксплуатационных нагрузок на ресурс и относительный ресурс безопасной эксплуатации основного металла и сварного соединения трубопровода в морской воде. Путем анализа макростроения поверхностей изломов показано увеличение негомогенности и появление дефектности в структуре основного металла и сварного соединения трубопровода вследствие предэксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: предэксплуатационная нагрузка, коррозионная усталость, долговечность, кинетика амплитуды циклической деформации, ресурс безопасной эксплуатации, относительный ресурс безопасной эксплуатации, морские трубопроводи.

The process of pipeline laying by *S* and *J*-methods for identifying the impact of preoperational load of laying cycle on the deformational behavior of the base metal and welded joint of pipeline with damaged insulation coating in service, its corrosion-fatigue life and resource of safe operation is performed. Low-frequency corrosion fatigue curves for specimens of the base metal and welded joint of offshore pipeline with and without preload are constructed according to the results of corrosion-fatigue tests under pure bending load circuit with frequency of 0.8 Hz load. Some regularities of impact of mechanical stress level and preoperational loads on resource and relative resource of safe operation of the base metal and welded joint of pipeline in sea water are estimated. By analyzing of macrostructure fracture surfaces the increasing of inhomogeneity and appearing of defects in the structure of the base metal and welded joint of pipeline due to preoperational loads is shown.

Keywords: preoperational load, corrosion fatigue, durability, kinetics of the amplitude of the cyclic strain, resource of safe operation, relative resource of safe operation, offshore pipelines.

Вивчення умов експлуатації морських трубопроводів показало, що їхнє руйнування відбуваються внаслідок спільного негативного впливу корозійно-активного середовища та знакозмінних навантажень з відносно невеликою частотою навантаження [1]. Якщо переміщення трубопроводу відбувається із значною амплітудою коливання, тобто при високих амплітудах циклічних напружень, то швидкість і характер корозійно-втомного руйнування трубопроводу визначатиме механічний чинник, а вплив електрохімічних процесів внаслідок малої тривало-

сті взаємодії з середовищем буде незначним. Тому в даному випадку довговічність визначатиметься в основному схильністю металу до деформаційного зміцнення або знеміцнення [2] з урахуванням впливу температури та адсорбційних ефектів [3]. При невеликих знакозмінних напруженнях швидкість руйнування трубопроводу визначатиметься корозійним чинником.

Метою роботи було дослідження впливу навантажень у процесі укладання на корозійно-втомну довговічність та ресурс безпечної експлуатації.

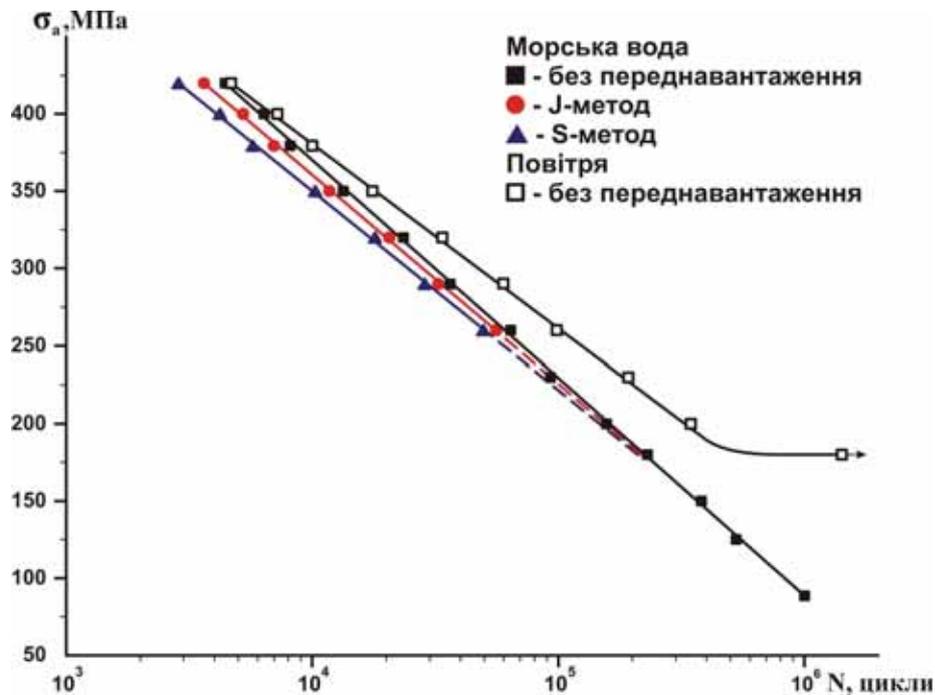


Рисунок 1 – Взаємне розташування ділянок кривих низькочастотної втоми та корозійної втоми сталі 09Г2С з переднавантаженням S- і J-методом та без нього

платуації морських трубопроводів, оскільки на даний час у діючих нормативних документах вони достатньо не враховуються.

Для вивчення поведінки матеріалу трубопроводу в циклі укладання та в області низькочастотної корозійної втоми (0,8 Гц) використовували циліндричні зразки-моделі з діаметром робочої частини $d=5$ мм, виготовлені із заготовок, вирізаних зі стінки труби. Для основного металу використовували довгі зразки з довжиною робочої частини $l_p=50$ мм, а для зварного з'єднання – короткі зразки з довжиною робочої частини $l_p=20$ мм. Об'єктом досліджень вибрано безшовні гарячедеформовані труби з низьколегованої сталі 09Г2С діаметром 426 мм із товщиною стінки 16 мм, які широко використовуються при спорудженні морських трубопроводів [1]. Корозійно-втомні випробування в середовищі морської води проводили за схемою навантаження чистим згином за розробленою раніше методикою [4].

Втомним випробуванням 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 передексплуатаційного навантаження (переднавантаження) в процесі укладання трубопроводу S-методом відбувалося шляхом одноциклового знакозмінного навантаження зразків, яке на діаграмі згину призводить до утворення петлі механічного гістерезису [5], яка складається з двох півциклів. Моделюванню процесу укладання трубопроводу J-методом відповідав перший півцикл навантаження, якому піддавались зразки під час моделювання його процесу укладання S-методом. Імітацію процесу укладання трубопроводу S- та J-мето-

дами проводили на зразках-моделях шляхом ступінчастого навантаження. Зі збільшенням чи зменшенням навантаження на один ступінь номінальні напруження змінювалися на величину $\Delta\sigma = 20$ МПа. Час витримки на кожній ступені t розраховується в залежності від рівня номінальних напружень та способу укладання з урахуванням того, що довжина укладання за цикл навантаження трубопроводу приймається рівною $L=300$ м [1], а швидкість укладання $V=3$ км/доб [6].

Переднавантаження 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.

За результатами корозійно-втомних досліджень були побудовані криві втоми для основного металу трубопроводу в морській воді (для імітації роботи з пошкодженим ізоляційним покриттям) з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S- та J-методом та без них (рис. 1). Аналіз одержаних кривих свідчить, що із збільшенням рівня номінальних напружень, в морській воді, як і на повітрі [7], посилюється негативний вплив переднавантаження на загальну довговічність сталі трубопроводу. Якщо при $\sigma_a = 260$ МПа в процесі укладання трубопроводу J- та S-методом довговічність зменшується в 1,07 та 1,16 разів (на 6,7 та 13,6 %), а при $\sigma_a = 320$ МПа – в 1,13 та 1,29 разів (на 11,3 та 22,5 % відповідно), то при $\sigma_a = 420$ МПа – в 1,23 та 1,55 разів (на 18,5 та 35,5 %) відповідно. При цьому умовна границя корозійної витривалості сталі трубопроводу на базі 10^6 циклів в морській воді складає $\sigma_{1к}=90$ МПа.

Як видно з рис. 1, ділянки кривих корозійної втоми знаходяться лівіше кривої втоми на повітрі, а точка перетину цих ділянок 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. Якщо за амплітуди напружень $\sigma_a = 320$ МПа довговічність сталі з переднавантаженням J і S-методом та без нього в морській воді у порівнянні з повітрям [7] зменшується в 1,33, 1,32 та 1,36 разів (на 25,1, 24,6 та 26,2 %), а при $\sigma_a = 260$ МПа – в 1,51, 1,49 та 1,58 разів (на 33,9, 32,9 та 36,6 %) відповідно, то при $\sigma_a = \sigma_{-1}$ – приблизно в 2 рази. Якщо ж порівняти довговічність сталі з переднавантаженням J і S-методом та без нього у морській воді з довговічністю сталі без переднавантаження на повітрі, то при $\sigma_a = 320$ МПа вона зменшиться в 1,53, 1,75 та 1,36 разів (на 34,6, 42,9 та 26,2 %), а при $\sigma_a = 260$ МПа – в 1,69, 1,82 та 1,58 разів (на 40,8, 45,2 та 36,6%) відповідно.

Одним з найбільш небезпечних наслідків впливу циклічних напружень та корозійно-активного середовища є не стільки інтенсифікація процесу корозії, скільки її перехід від загальної до місцевої. Циклічні напруження після певного числа циклів навантаження в найбільш перенапружених і слабких зернах поверхневого шару зразка (зазвичай в концентраторах напружень) викликають зсуви по площинах ковзання. Адсорбція поверхнево-активних елементів середовища (атоми, іони, комплекси), знижуючи поверхневу енергію металу та полегшуючи роботу приповерхневих джерел дислокацій і їх вихід на поверхню, прискорює зсувні процеси (первинний процес впливу середовища). Переміщення дислокацій вздовж смуг ковзання після кожного циклу навантаження призводить до утворення ділянок ювенільних поверхонь, які стають анодами і разом з поверхнею зразка та бічними стінками тріщин утворюють гальванічні пари (вторинний процес впливу середовища). Анодний процес буде найбільш інтенсивним в місцях виникнення зсувів, біля вершин утворених мікро- і макротріщин втоми, оскільки в цих місцях відбувається найбільше зниження електродного потенціалу при циклічному навантаженні зразка. Також розчинення анодних ділянок посилюється тим, що їхня площа значно менша від площі катодних ділянок (дно тріщини – анод, стінки тріщини і зовнішня поверхня зразка – катод). Слід зазначити, що в зародженні мікрогальванічних пар корозійної втоми важливу роль відіграють не тільки місця виходу на поверхню дислокацій, але й зміна субструктури металу, що полягає в дробленні окремих зерен на субзерна з різною орієнтацією, які збільшують його електрохімічну гетерогенність.

Також на процес корозійної втоми можуть впливати багато інших чинників, які залежно від умов будуть проявлятися тією чи іншою мірою. На корозійну втому можуть впливати зменшення анодної поляризації, скупчення до-

мішок або атомів легуючих елементів на дефектних ділянках, що з'явилися в результаті ковзання, та на границях кристалітів і субзерен [8]. Вони утворюють один з електродів гальванічної пари, що бере участь у зародженні тріщини. На корозійно-втомний процес може впливати менша, ніж на поверхні, концентрація кисню або пасивно-активних елементів у тріщинах, утворених шляхом зародження та поглиблення мікротріщин. Це сприяє інтенсивному роз'їданню дна тріщини, яке виступає в ролі анода. При цьому продукти корозії, утворені всередині тріщини, що мають, як правило, більший об'єм, ніж розчинений метал, можуть виконувати розклиновальну дію і, таким чином, збільшувати швидкість росту тріщини. Крім того, в тріщині можуть утворюватися продукти електрохімічної реакції, що відрізняються більш високою агресивністю, ніж саме корозивне середовище [9]. Таким чином, виникають сприятливі умови для наводнювання металу. Досить важливим чинником, що прискорює процес корозійної втоми, є руйнування окисних плівок, яке призводить до різкого зниження електродного потенціалу. Крім того, саме циклічне навантаження, при інших рівних умовах, активуючи метал, знижує роботу виходу, внаслідок чого іон металу легше може покинути кристалічну ґратку і перейти в розчин, ніж за відсутності напружень.

Як бачимо, результати втомних випробувань не показали значного впливу переднавантаження на загальну довговічність матеріалу трубопроводу як на повітрі, так і у середовищі морської води. Звідси виникає хибне уявлення про можливість нехтування історією передексплуатаційних навантажень в процесі укладання на ресурс роботи трубопроводу. Але насправді ситуація докорінно інша. Експлуатація трубопроводу в умовах поширення в його матеріалі втомних (корозійно-втомних) тріщин є неприпустимою і лише об'єднаний аналіз кривих втоми та кінетичних кривих деформації дає змогу правильно оцінити ресурс, ураховуючи, що тривалість останньої стадії може скласти понад 30% загальної довговічності. Тому необхідно розробляти та впроваджувати новітні методичні підходи, які дають змогу забезпечити надійну роботу морських трубопроводів на основі науково обґрунтованих рішень, а не банально збільшуючи коефіцієнт запасу міцності. Така практика особливо потрібна в часі світової фінансової кризи і дасть змогу заощадити кошти на етапі спорудження шляхом оптимізації вибору матеріалу трубопроводу та зменшення металоємності конструкції. У Енергетичній стратегії України до 2030 року значну увагу приділено нарощуванню власного видобутку нафти і газу головні неосвоєні поклади якого знаходяться на шельфі Чорного та Азовського морів. Розвиток шельфового видобутку неодмінно супроводжуватиметься спорудженням морських підводних трубопроводів, тому наукові дослідження у даному напрямку безпосередньо підвищуватимуть енергетичну безпеку держави.

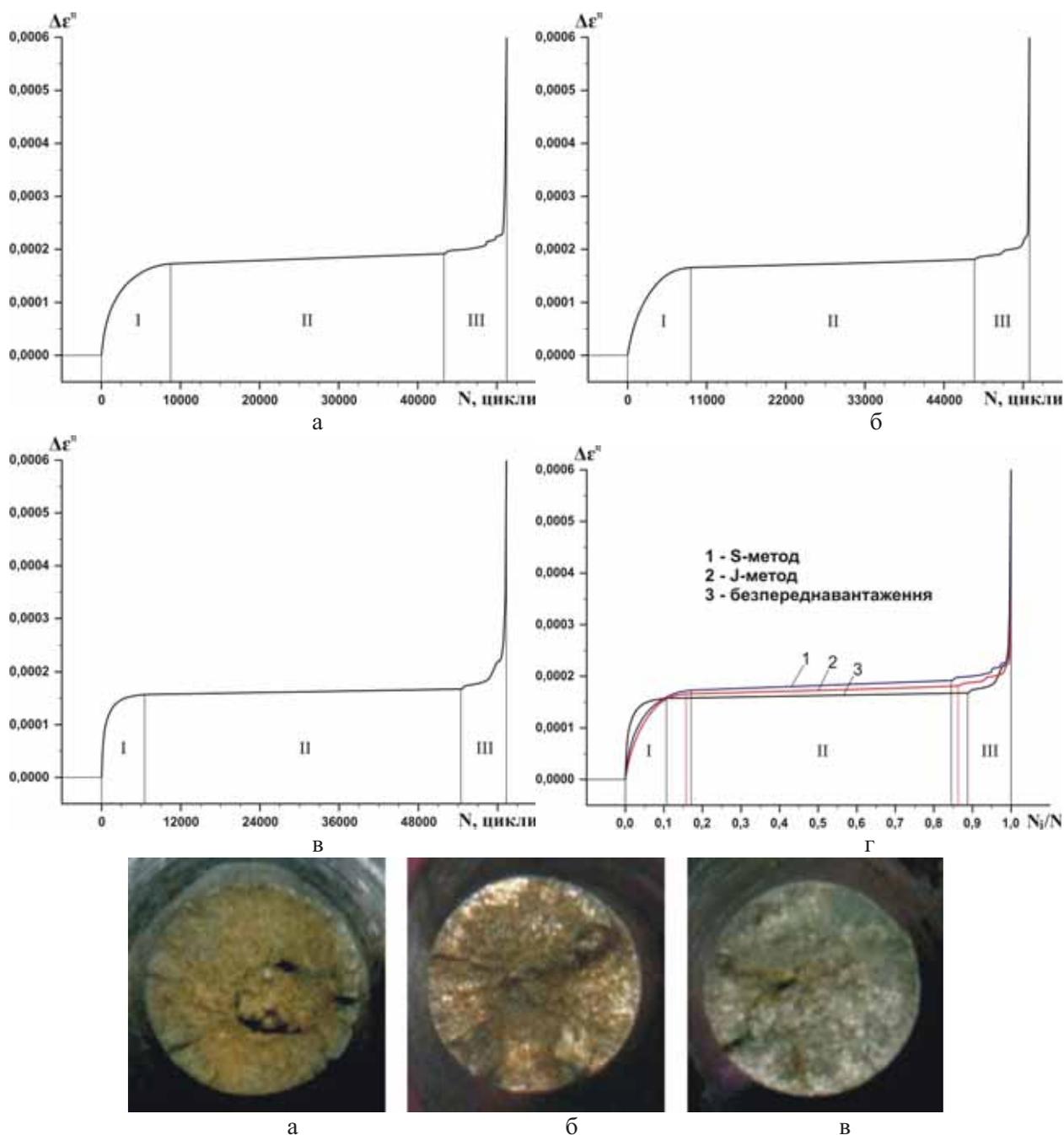


Рисунок 2 – Кінетика амплітуди циклічної деформації сталі 09Г2С та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 260 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

Криві втоми трубних сталей не розкривають стадійності цього складного процесу, тому нами здійснено комп'ютерну реєстрацію кінетики деформації при низькочастотному навантаженні. Користуючись побудованою за результатами механічних випробовувань зразків-моделей діаграмою згину, з метою кращого порівняльного аналізу нами було вибрано три рівні номінальних напружень відповідно до величини границі плинності матеріалу трубопроводу $\sigma_{0,2}$: $0,95\sigma_{0,2}$, $1,15\sigma_{0,2}$ та $1,5\sigma_{0,2}$, які відповідно становлять 260, 320 та 420 МПа.

За результатами корозійно-втомних досліджень досліджень нами були одержані кінетичні криві деформації зразків-моделей з перед-

навантаженням S та J-методом та без нього (рис. 2, 3, 4) у морській воді. 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, 3, 4, г). Вони показують порівняно з повітрям зростання тривалості I-ої стадії низькочастотної корозійної втоми як для переднавантажених зразків, так і для зразків без попереднього навантаження при 260 і 320 МПа та, навпаки, – її зниження при 420 МПа. При цьому, для переднавантажених зразків зберігається тенденція до збільшення амплітуди ста-

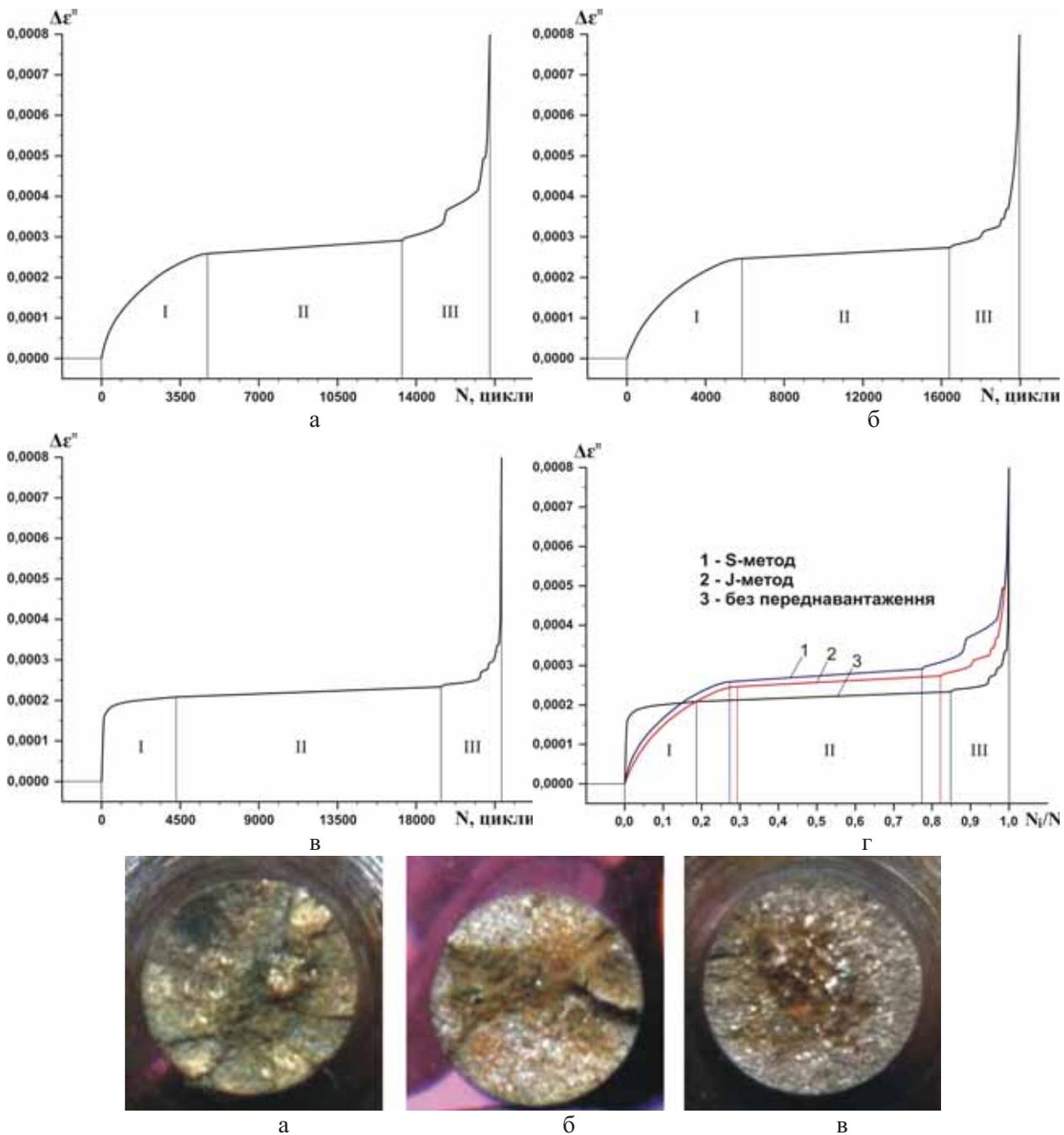


Рисунок 3 – Кінетика амплітуди циклічної деформації сталі 09Г2С та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 320 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

білізації пластичної деформації на початку II-ї стадії при 260 і 320 МПа та її незначного зменшення при 420 МПа.

Для випадку попереднього переднавантаження J-методом величина амплітуди стабілізації циклічної деформації порівняно зі звичайним навантаженням при випробуваннях на рівні напружень 260 МПа та 320 МПа зростає відповідно на 8,1 % та 16,9 %, а при рівні напружень 420 МПа – знижується на 4,1%. Для випадку попереднього переднавантаження S-методом ця величина порівняно зі звичайним навантаженням при випробуваннях на рівні напружень 260 МПа та 320 МПа зростає відпо-

відно на 12,9% та 23,9 %, а при рівні напружень 420 МПа – знижується на 7,8 %.

Також слід зазначити, що морська вода інтенсифікує процес циклічного деформування та зумовлює збільшення амплітуди стабілізації циклічної деформації на початку II-ї стадії порівняно з повітрям, що можна пов'язати з адсорбційним впливом електроліту. Загалом механізм руйнування трубопроводу з пошкодженим ізоляційним покриттям в морській воді можна пояснити, виходячи з адсорбційно-електрохімічної теорії корозійної втоми [9]. Вона зводиться до того, що на початку прикладання циклічних напружень відбуваються мікродформації металу, а також адсорбційні, дифузійні і корозійні

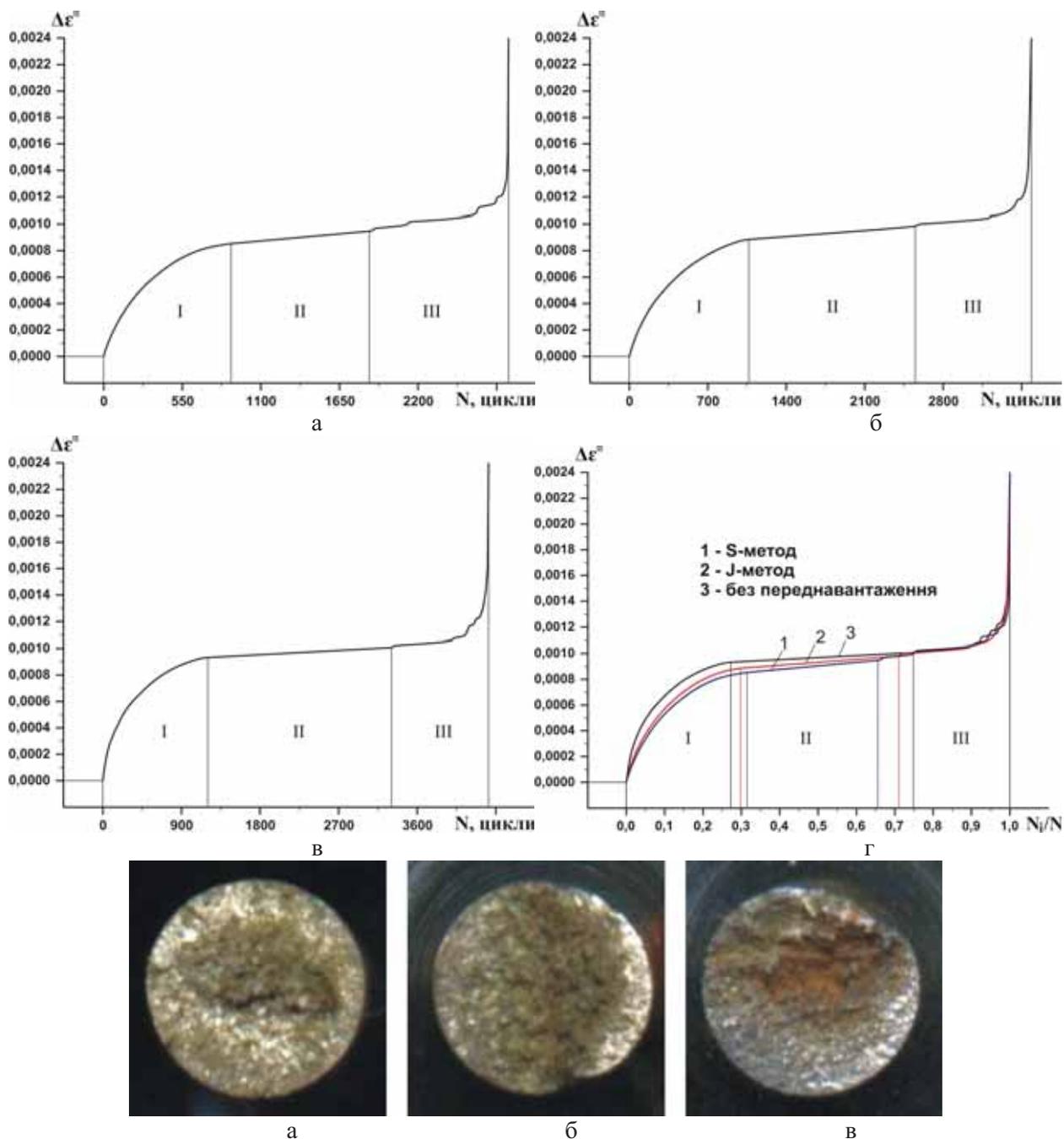


Рисунок 4 – Кінетика амплітуди циклічної деформації сталі 09Г2С та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 420 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

процеси, які посилює деформація. Циклічні напруження спричиняють зсуви з надривами, на основі яких виникають втомні тріщини, в яких локалізується анодний процес. Корозійно-активне середовище розчиняє анодні ділянки поверхні металу. Але швидше за корозію протікає адсорбція поверхнево-активних компонентів середовища – іонів або молекул з електроліту, яка проявляється в зменшенні втомної витривалості – явищі адсорбційної втоми [10]. Адсорбція, полегшуючи роботу приповерхневих джерел дислокацій, їх вихід на поверхню, інтенсифікує зсувні процеси і, відповідно, мікрodeформацію (ефект Ребіндера). Так, зростання амплітуди стабілізації циклічної деформації

для всіх зразків з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу J та S-методом та без них в морській воді порівняно з повітрям складає при $\sigma_a = 260$ МПа 19,4, 14,7 та 27,8 %, при $\sigma_a = 320$ МПа – 15,5, 13,2 та 17,1 %, а при $\sigma_a = 420$ МПа – 14,9, 23,2 та 1,7 % відповідно. Дане явище додатково пояснює зменшення загальної довговічності та ресурсу безпечної експлуатації трубопроводу, який відповідає III-ій стадії низькочастотної корозійної втоми, порівняно з повітрям.

Циклічне формування на завершальній III стадії пов'язане з прискореним ростом корозійно-втомних тріщин, формуванням та поширенням магістральної тріщини аж до початку

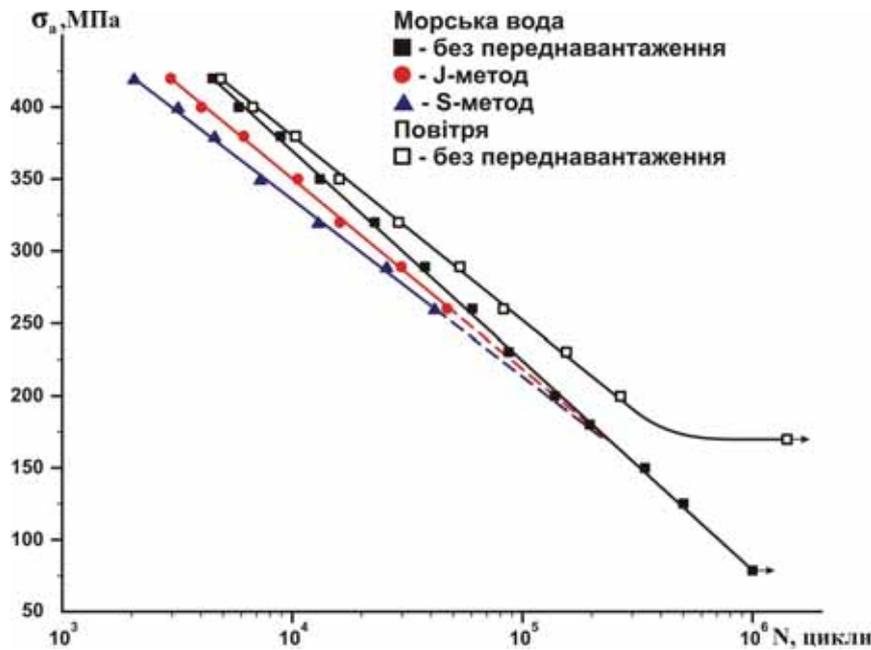


Рисунок 5 – Взаємне розташування ділянок кривих втоми та корозійної втоми зварного з'єднання з переднавантаженням S- і J-методом та без нього

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 є недостатньо 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 .

Введене поняття ресурсу безпечної експлуатації дозволяє розділити повний період експлуатації на роботу в штатному режимі та живучість трубопроводу, тобто безаварійну роботу в режимі обмеженої або мінімальної функціональності, спричинену прискореним розвитком втомних (корозійно-втомних) тріщин. Запровадження таких підходів дозволить підвищити безпеку експлуатації морських нафтогазопроводів та мінімізувати ризики їх розгерметизації і руйнування, що сприятиме також підвищенню їх екологічної безпеки.

Макробудова зламів при корозійній втомі відрізняється від такої на повітрі, оскільки на неї суттєво впливають продукти корозії, перешкоджаючи змиканню берегів тріщини в циклі стиску. Також характерним тут є багатолопатевий вигляд зламу, пов'язаний з паралельним поширенням кількох магістральних тріщин. Як і у випадку випробовувань на повітрі, аналізуючи вигляд поверхонь руйнування спостерігаємо збільшення частки крихкого руйнування у переднавантажених зразків.

Як видно з одержаних результатів, передексплуатаційні навантаження зменшують відносний ресурс безпечної експлуатації сталі морських трубопроводів з пошкодженим ізоляційним покриттям при укладанні S-методом від 4,2 до 9,1%, а при укладанні J-методом – від 2,6 до 3,6 % (рис. 9, а).

Руйнування морських трубопроводів під час експлуатації доволі часто відбувається в області зварного з'єднання. При утворенні зварного шва (ЗШ) виникає ряд факторів, які сприяють концентрації корозійних уражень. До них відносяться неоднорідність складу і структури металу шва, наявність шлакових і газових включень, залишкових напружень, перегрів і перекристалізація внаслідок термічної дії зварювання [11].

Інтенсивна корозія зварного з'єднання пояснюється тим, що зона стику – це контакт двох металів (наплавленого і основного). Відмінності у складі та структурі ЗШ та основного металу труб, а також різні значення електродних потенціалів у морській воді можуть спричинити утворення макрогальванічної пари “ЗШ-основний метал”. Якщо електродний потенціал ЗШ буде більш від'ємним, то виникне пара, в якій він буде анодом, а основний метал – катодом. Це дуже небезпечне явище, оскільки площа поверхні ЗШ значно менша за її значення для основного металу, більша площа поверхні якого полегшує деполаризацію катодного процесу. Корозійні процеси концентруються на ЗШ і спричиняють його швидке руйнування.

За результатами корозійно-втомних досліджень були побудовані криві втоми для зварного з'єднання трубопроводу в морській воді (для імітації роботи з пошкодженим ізоляційним покриттям) з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S та J-методом та без них (рис. 5). Вони, як і дослідження на повітрі, підтверджують негативний вплив переднавантаження на загальну довговічність, який посилюється зі збільшенням рівня номінальних напружень. Якщо при $\sigma_a = 260$ МПа в процесі укладання трубопроводу J- та S-методом довговічність зменшується в 1,15 та 1,30 разів (на 13,2 та 23,2 %), а

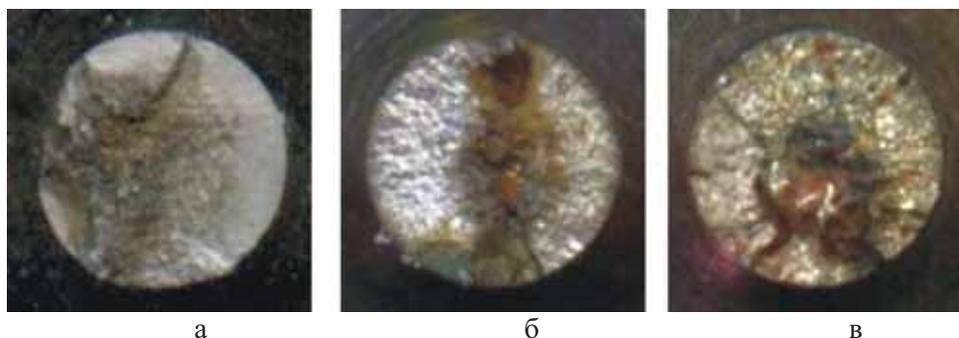
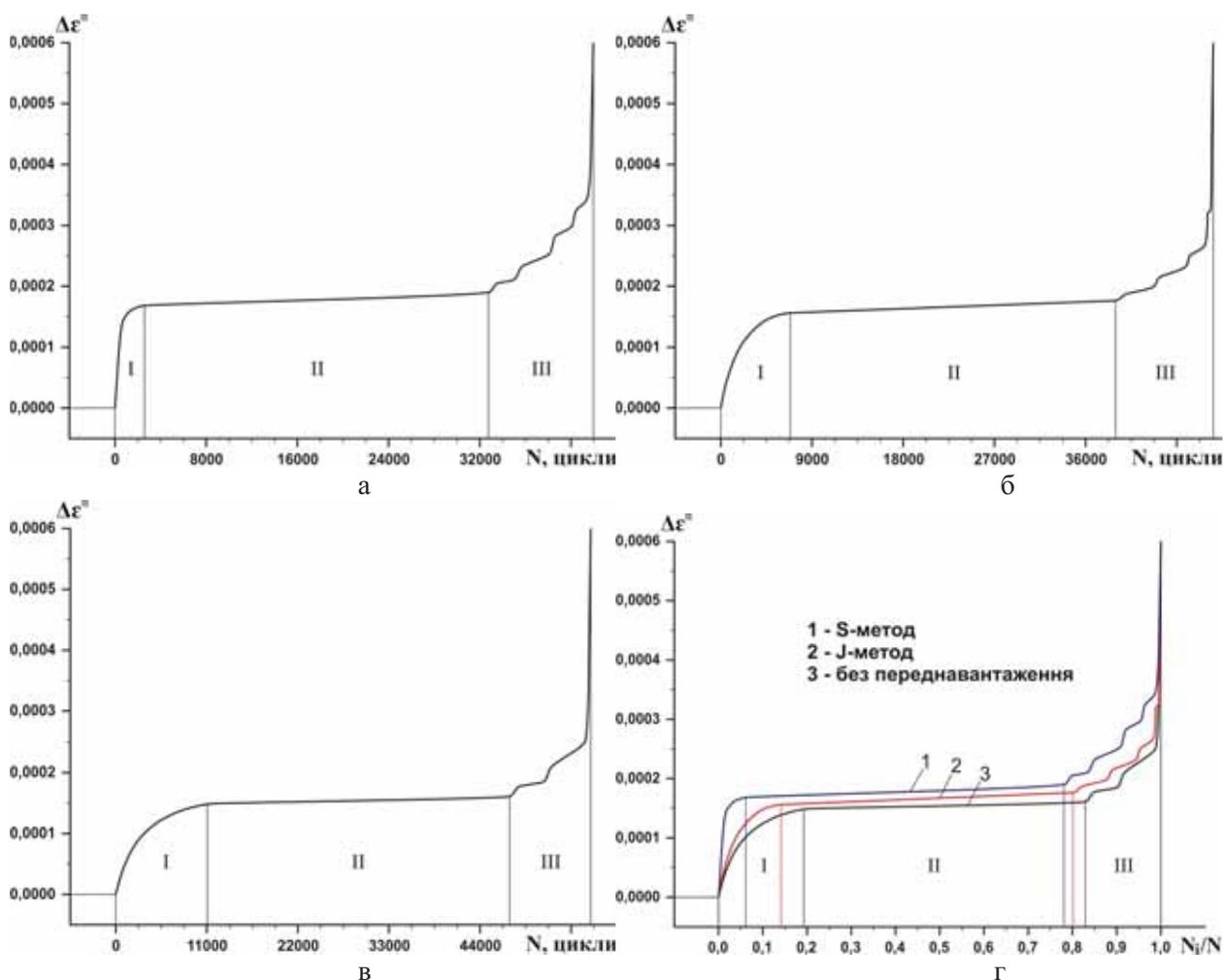


Рисунок 6 – Кінетика амплітуди циклічної деформації зварного з'єднання та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 260 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

при $\sigma_a = 320$ МПа – в 1,28 та 1,59 разів (на 21,9 та 36,9 % відповідно), то при $\sigma_a = 420$ МПа – в 1,52 та 2,20 разів (на 34,4 та 55,2 %) відповідно. При цьому 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.

При зниженні σ_a від 420 МПа довговічність зварного з'єднання в корозійному середовищі, у порівнянні з повітрям, зменшується більш істотно, ніж для сталі трубопроводу. Так, якщо за амплітуди напружень $\sigma_a = 320$ МПа довговічність зварного з'єднання з переднавантаженням J- і S-методом та без нього в морській воді

порівняно з повітрям зменшується в 1,40, 1,43 та 1,39 разів (на 28,7, 29,9 та 28,1%), а при $\sigma_a = 260$ МПа – в 1,58, 1,59 та 1,61 разів (на 36,7, 37,1 та 37,9 %) відповідно, то при $\sigma_a = \sigma_{-1}$ – приблизно в 2 рази (так само, як і для сталі трубопроводу). Якщо ж порівняти довговічність зварного з'єднання з переднавантаженням J і S-методом та без нього у морській воді з довговічністю зварного з'єднання без переднавантаження на повітрі, то при $\sigma_a = 320$ МПа вона зменшиться в 1,78, 2,20 та 1,39 разів (на 43,8, 54,6 та 28,1 %), а при $\sigma_a = 260$ МПа – в 1,86, 2,10 та 1,61 разів (на 46,1, 52,3 та 37,9 %) відповідно.

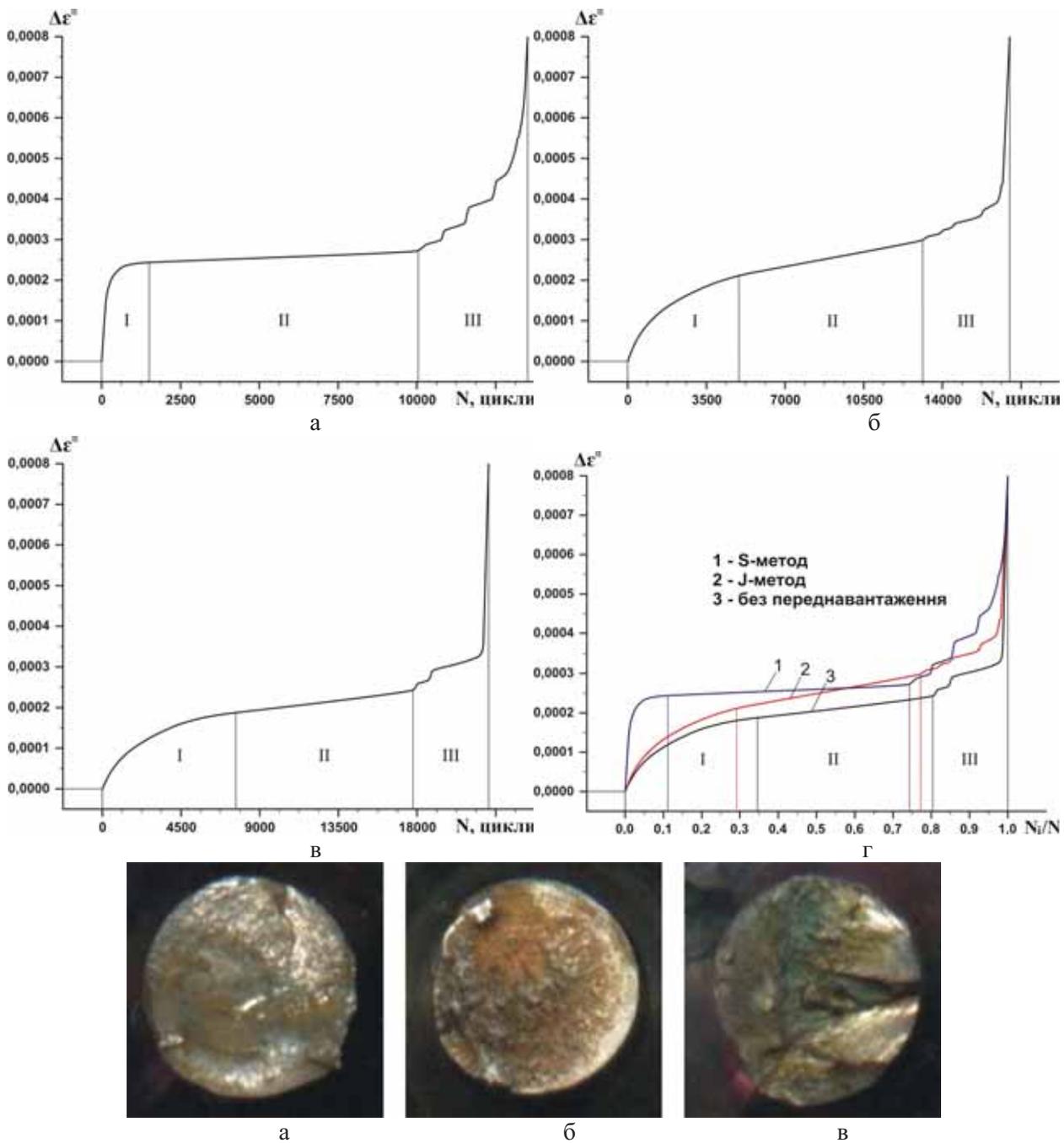


Рисунок 7 – Кінетика амплітуди циклічної деформації зварного з'єднання та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 320 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

Як і для основного металу, тут спостерігається незначний вплив передексплуатаційних навантажень на загальну довговічність зварного з'єднання, що зайвий раз доводить недостатність використання даного параметру при оцінці і прогнозуванні ресурсу експлуатації трубопроводу. Зокрема, порівняльний аналіз кінетики деформації та руйнування свідчить (рис. 2, 3, 4), що тривалість завершальної стадії становить від 18 до 34 %. Така похибка в оцінюванні ресурсу може призвести до виникнення аварійних ситуацій на пізній стадії експлуатації та істотно підвищувати рівень експлуатаційних ризиків.

Одержані за результатами корозійно-втомних досліджень досліджень кінетичні криві де-

формації зварного з'єднання з переднавантаженням S та J-методом та без нього (рис. 6, 7, 8) у морській воді вказують на зростання, порівняно з повітрям, тривалості I-ої стадії низькочастотної корозійної втоми для всіх досліджуваних амплітуд напружень. При цьому, для переднавантажених зразків при 420 МПа тривалість I-ї стадії корозійної втоми більша, ніж для зразків без попереднього навантаження. Внаслідок цього збільшення амплітуди стабілізації пластичної деформації на початку II-ї стадії спостерігається для всіх переднавантажених зразків.

Для випадку попереднього переднавантаження J-методом величина амплітуди стабілізації циклічної деформації порівняно зі зви-

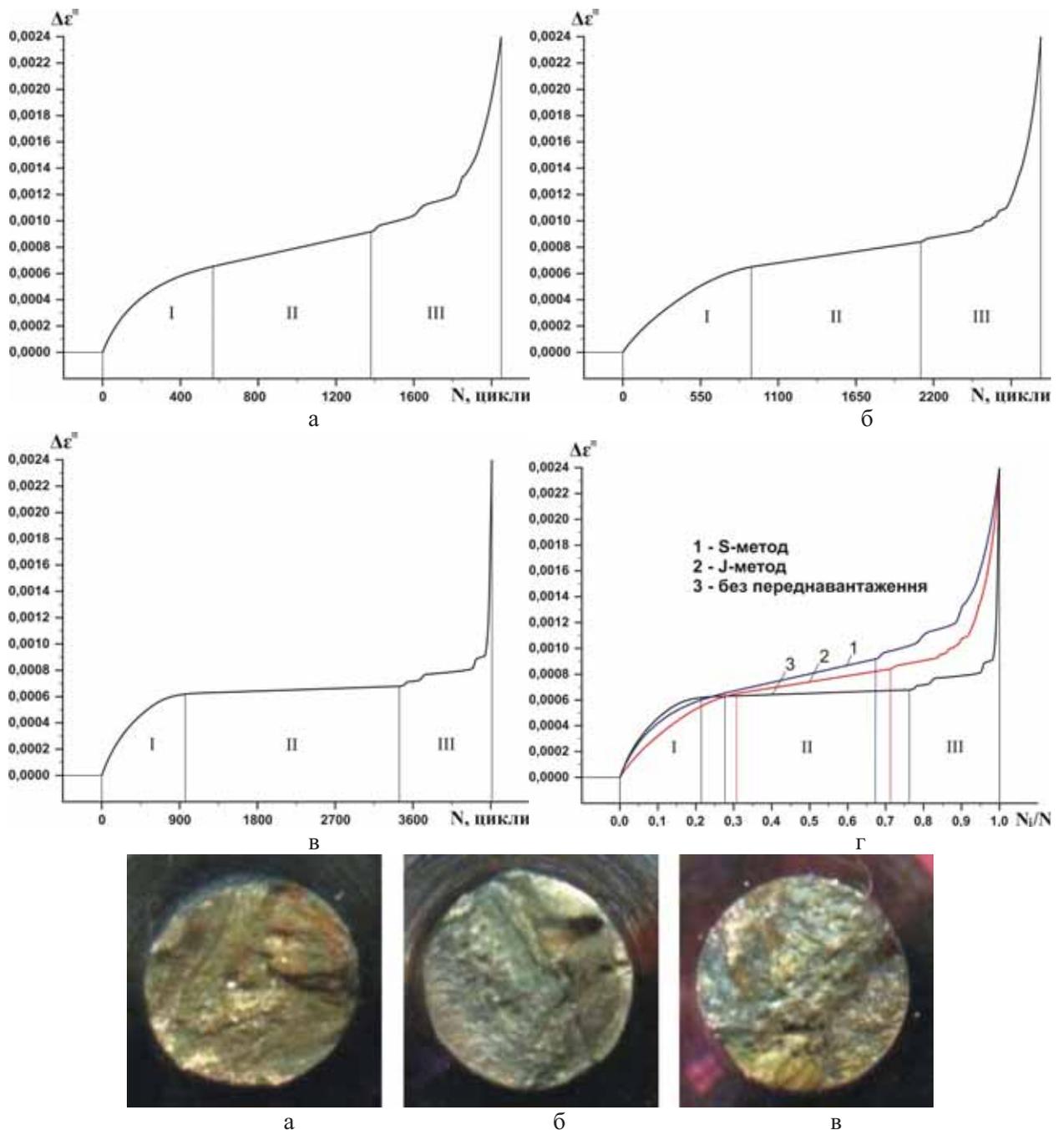


Рисунок 8 – Кінетика амплітуди циклічної деформації зварного з'єднання та вигляд поверхонь руйнування за рівня напружень 420 МПа з переднавантаженням S- (а), J-методом (б) та без нього (в) і в об'єднаному вигляді (г) у морській воді

чайним навантаженням при випробуваннях на рівні напружень 260 МПа, 320 МПа та 420 МПа зростає відповідно на 7,6, 18,1 та 14,9 %. Для випадку попереднього переднавантаження S-методом ця величина порівняно зі звичайним навантаженням при випробуваннях на аналогічних рівнях напружень зростає відповідно на 16,5, 19,9 та 21,8 %. Також слід зазначити, що агресивна дія корозійно-активного середовища внаслідок причин, наведених вище, призводить до значно сильнішої інтенсифікації процесу циклічного деформування зварного шва і, як наслідок, зумовлює більш відчутне зростання амплітуди стабілізації циклічної деформації на початку II-ї стадії порівняно з основним мета-

лом у морській воді. Так, зростання амплітуди стабілізації циклічної деформації для всіх зразків з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу J та S-методом та без них в морській воді порівняно з повітрям складає при $\sigma_a = 260$ МПа 21,7, 19,6 та 27,9 %, при $\sigma_a = 320$ МПа – 29,6, 20,5 та 22,8 %, а при $\sigma_a = 420$ МПа – 68,2, 56,8 та 7,3 % відповідно. Даний висновок підтверджують побудовані за результатами корозійно-втомних випробувань діаграми циклічного кругового згину для зразків зі зварного з'єднання.

Аналіз поверхонь руйнування зразків зварного з'єднання дає змогу виокремити цікаві особливості. У високоамплітудній області

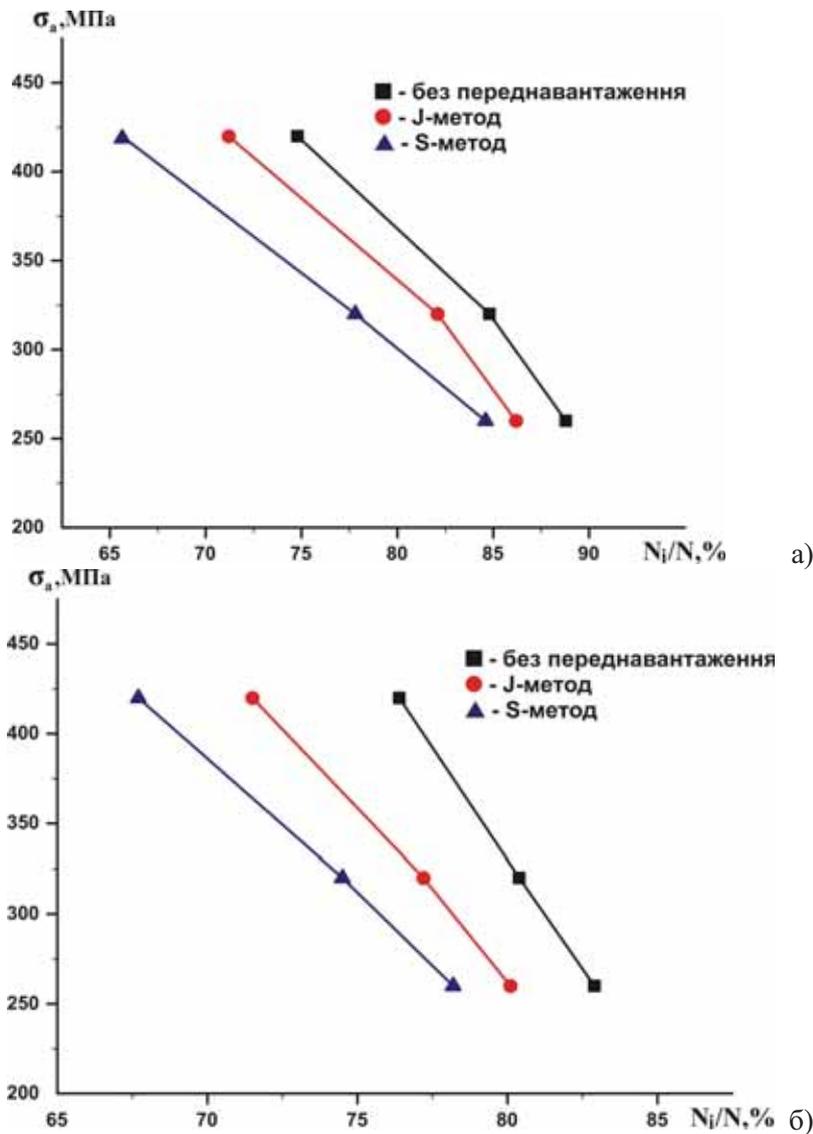


Рисунок 9 – Відносний ресурс безпечної експлуатації сталі 09Г2С (а) та зварного з’єднання (б) з переднавантаженням S- і J-методами та без нього в морській воді

спостерігаємо зменшення кількості тріщин, які одночасно поширюються, що свідчить про переважуючу роль механічного чинника та вичерпання ресурсу пластичності. В таких умовах у всіх випадках переважає крихкий механізм руйнування, який викликає розвиток однієї або двох корозійно-втомних тріщин. При переході в низькоамплітудну область (320, 260 МПа) фіксуємо схожу тенденцію тільки для переднавантажених зразків, які через зменшення ресурсу пластичності руйнуються за крихким механізмом. Для непереднатажених зразків спостерігаємо класичний багатолопатовий корозійно-втомний злам (рис. 7, 8, в), причому із зменшенням амплітуди напружень кількість тріщин, які одночасно поширюються в декількох паралельних площинах, збільшується. Особливо наглядним цей процес є за рівня номінальних напружень 260 МПа. Така механіка руйнування підтверджує негативний вплив передексплуатаційних навантажень не тільки у пружно-пластичній зоні, а й області близько та нижче границі плинності.

Під час аналізу процесу корозійно-втомного руйнування слід пам’ятати про схильність тріщин при цьому виді руйнування до розгалуження, затуплення та закриття. Підвищену схильність до розгалуження тріщин проявляє метал зварного з’єднання [11]. При цьому, фронт поширення тріщини перетинає зерна фериту.

Аналіз одержаних результатів свідчить (рис. 9,б), що передексплуатаційні навантаження зменшують відносний ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів з пошкодженим ізоляційним покриттям при укладанні S-методом від 4,7 до 8,7%, а при укладанні J-методом – від 2,8 до 4,9%.

Таким чином, за результатами корозійно-втомних випробовувань зразків основного металу та зварного з’єднання морських трубопроводів встановлено закономірності впливу передексплуатаційних навантажень на опір корозійній втомі та ресурс безпечної експлуатації у середовищі морської води.

Висновки

1. Побудовано ділянки кривих корозійної втоми зразків основного металу та зварного з'єднання морських трубопроводів і вперше встановлено закономірності впливу передексплуатаційних навантажень у процесі укладання на корозійну витривалість матеріалу трубопроводу.

2. Вивчено вплив переднавантаження на деформаційну поведінку матеріалу лінійної частини та зварного з'єднання трубопроводу з пошкодженим ізоляційним покриттям.

3. Шляхом порівняльного аналізу поверхонь руйнування доведено негативний вплив переднавантаження, який полягає у вичерпанні ресурсу пластичності не тільки у високоамплітудній області, а і при рівнях номінальних напружень нижче границі плинності.

4. Експериментально доведено недостатність використання довговічності як базового критерію оцінки ресурсу роботи морських трубопроводів.

Література

1 Капустин К.Я. Строительство морских трубопроводов / К.Я. Капустин, М.А.Камышев. – М.: Недра, 1982. – 207 с.

2 Побережний Л.Я. Кінетика деформації та електродного потенціалу сталі трубопроводу при низькочастотному навантаженні у морській воді / Л.Я. Побережний // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – №1. – С. 76-82.

3 Коррозионная усталость металлов: Тр. I сов.-англ. семинара / АН УССР, Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко; под ред. акад. Я. М. Колотыркіна. – К.: Наукова думка, 1982. – 372 с.

4 Крижанівський Є.І. Установка для комплексних досліджень малоциклової втоми матеріалу морських трубопроводів у робочих середовищах / Є.І.Крижанівський, Л.Я. Побережний // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – № 5. – С. 44-45.

5 Побережний Л.Я. Вплив способу укладання на ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів / Л.Я. Побережний, Т.Ю. Пиріг // Вісник ТНТУ. – 2011. – Спец. вип., ч.1 – С. 101-106.

6 Ільницький М.К. Проектування, будівництво та експлуатація морських трубопроводів / М.К. Ільницький, О.Б. Шадрін. – К.: Українська книга, 1997. – 174 с.

7 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.

8 Улиг Г.Г. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику / Г. Г. Улиг, Р. У. Реві; [пер. с англ. под ред. А. М. Сухотина]. – Л.: Химия, 1989. – 456 с.: ил.

10 Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов / В. И. Похмурский – М.: Металлургия, 1985. – 206 с.

11 Похмурський В.І. Адсорбційно-електрохімічна теорія корозійної втоми металів / В. І. Похмурський // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – №2. – С. 21-30.

12 Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко – К.: Наукова думка, 2006. – 620 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії

14.02.13

Рекомендована до друку

професором Грудзом В.Я.

(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)

професором Букетовим А.В.

(Херсонська державна морська академія,

м. Херсон)