

## ВТОМНА ДОВГОВІЧНІСТЬ ТА КІНЕТИКА ДЕФОРМАЦІЇ МАТЕРІАЛУ ТРУБОПРОВОДУ ЗА НИЗЬКОЧАСТОТНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Л.Я. Побережний, Т.Ю.Пиріг

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) ,  
e-mail: poberezhny@nuing.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 в процесі експлуатації, його втомну довговічність та ресурс безпечної експлуатації. За результатами втомних випробовувань за схемою навантаження чистим згином з частотою навантаження 0,8 Гц побудовано криві низькочастотної 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 безпечної експлуатації основного металу та зварного морського трубопроводу та доведено необхідність урахування передексплуатаційних навантажень при встановленні ресурсу роботи та залишкового ресурсу безпечної експлуатації морських трубопроводів.*

Ключові слова: переднавантаження, низькочастотна втома, довговічність, кінетика деформації, ресурс безпечної експлуатації.

*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 в процессе эксплуатации, его усталостную долговечность и ресурс безопасной эксплуатации. По результатам усталостных испытаний по схеме нагрузки чистым изгибом с частотой нагрузки 0,8 Гц построены кривые низкочастотной 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 безопасной эксплуатации основного металла и сварного соединения морского трубопровода и доказана необходимость учета предэксплуатационных нагрузок при установке ресурса работы и остаточного ресурса безопасной эксплуатации морских трубопроводов.*

Ключевые слова: преднагрузка, низкочастотная усталость, долговечность, кинетика деформации, ресурс безопасной эксплуатации.

*The modeling of pipeline stringing process by means of S- and J-methods for the purpose of detection of influence of pre-operational load in the stringing cycle onto the deformation behavior of the main metal and pipeline welded joint during the process of operation, its fatigue life, and safe operation life has been done. The curves of low-frequency fatigue of the samples from the main metal and subsea pipeline welded joint with pre-loading and without it have been built as a result of the fatigue tests in accordance with the scheme of load by means of pure bending with 0,8Hz load frequency. Some regularities of the influence of level of mechanical stresses and pre-operational loads onto the safe operation life of the main metal and subsea pipeline welded joint have been determined and the necessity of taking pre-operational load under establishing of work life and residual life of subsea pipeline safe operation into account has been proven.*

Key words: pre-load, low-frequency fatigue, durability, cycle deformation kinetics, safe operation life.

Поступове виснаження запасів нафтогазових ресурсів на суші та загальносвітове зростання потреби в енергоносіях зумовили різку активізацію пошуково-розвідувальних робіт в акваторіях Світового океану, в надрах якого зосереджено майже утричі більше покладів вуглеводнів, ніж на суші, та, як наслідок, збільшення видобутку нафти і газу на континентальному шельфі, частка якого в світовому обсязі видобування продовжує невпинно зростати.

На сьогоднішній день Україна володіє значним енергетичним потенціалом Чорноморсько-Азовського регіону, який має стратегічне значення для держави з огляду на гостру необхідність зменшення тотальної залежності від російських поставок енергоносіїв. Тому з 2012 року “Чорноморнафтогаз” значно інтенсифікував розробку морського шельфу. Компанією закуплено дві сучасні самопідйомні плаваючі бурові установки (СПБУ), одна з яких – “Петро

Годованець” – вже введена в експлуатацію в червні цього року, а прибуття іншої – “Незалежність” – очікується наприкінці року. За даними компанії, нові СПБУ 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 високотехнологічних СПБУ “Чорноморнафтогаз” безпосередньо пов'язує плани щодо збільшенню до 2015 року річного видобутку природного газу на шельфі Чорного і Азовського морів утричі (до 3 млрд м<sup>3</sup>) і, відповідно, зниження залежності України від імпорتنних енергоносіїв.

Під час будівництва морських трубопроводів застосовують різні способи їх укладання, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Вибір способу укладання для конкретного випадку залежить від низки чинників, що визна-

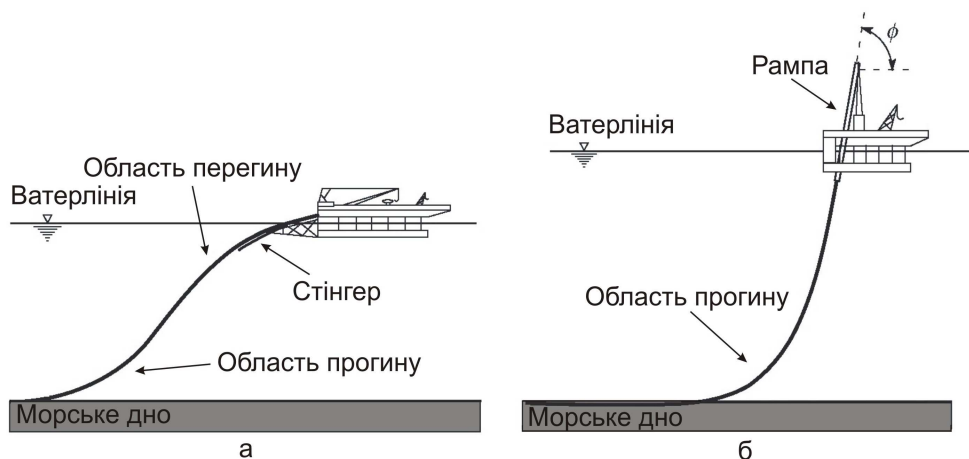


Рисунок 1 – Прокладання трубопроводу S-методом (а) та J-методом (б)

чають організацію процесу його будівництва (наявність технічних засобів, конструкція і призначення трубопроводу, гідрометеорологічні та геологічні умови району будівництва, топографія морського дна, період проведення робіт, умови судноплавства і т.д.) [1]. Проте у світовій практиці найбільшого поширення набули два способи укладання морських трубопроводів: S-метод (рис. 1, а), який має обмеження за глибиною зверху, і J-метод (рис. 1, б), використання якого, навпаки, лімітовано мінімально допустимою глибиною. Тому на практиці доводиться застосовувати поєднання цих двох технологій, а саме: вести будівництво прибережних ділянок за допомогою суден, що реалізують S-метод, а укладання трубопроводу на більш глибоководних ділянках моря продовжувати J-методом. Обидва способи укладання одержали свою назву від форми викривленої ділянки трубопроводу між кормою баржі-трубоукладача і морським дном.

Найбільші згинальні напруження в трубопроводі при його укладанні S-методом виникають на опуклій та ввігнутой ділянках [2]. Напруження на ввігнутой ділянці регулюються за допомогою натяжних пристроїв, які призначені для збільшення радіуса кривизни та, відповідно, зменшення згинального моменту в провисаючому прольоті трубопроводу, а напруження на опуклій ділянці обмежуються стінгером, форма якого може регулюватися в процесі укладання трубопроводу. Зі збільшенням глибини моря та діаметра трубопроводів потрібні дедалі більш потужні стінгери та поздовжні зусилля натягу, яких може виявитися недостатньо для створення необхідного напружено-деформованого стану трубопроводів. Тому на даний час при будівництві трубопроводів на значних глибинах все більш широкого застосування набуває J-метод.

Особливість J-методу полягає в тому, що контроль за напружено-деформованим станом нижньої ввігнутої ділянки трубопроводу здійснюється за допомогою рампи, призначенням якої є коригування кута нахилу  $\phi$  верхнього кінця трубопроводу відносно горизонтальної площини та його сили натягу. Можливість про-

кладання трубопроводів на значно більших морських глибинах порівняно з S-методом забезпечується за рахунок збереження прямолінійності верхньої частини провисаючої ділянки трубопроводу.

Після укладання трубопроводу метал під ізоляційним покриттям в умовах експлуатації піддаватиметься низькочастотній втомі, яка, в залежності від амплітуди напружень чи деформацій може бути малоцикловою та багатоцикловою.

Метою нашої роботи було дослідження впливу навантажень у процесі укладання на втомну довговічність та ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів, оскільки на даний час у діючих нормативних документах вони достатньо не враховуються.

Матеріалом для досліджень слугувала труба сталь 09Г2С. Експериментальні зразки-моделі з  $l_p/d = 10$  ( $l_p$ ,  $d$  – довжина та діаметр робочої частини зразка відповідно) випробовували на повітрі ( $T = 293$  К) за схемою навантаження чистим згином з частотою обертання зразка 0,8 Гц за розробленою раніше методикою [3].

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. Імітацію процесу укладання трубопроводу S- та J-методами проводили на зразках-моделях шляхом ступінчастого навантаження за прискороною методикою. При збільшенні чи зменшенні навантаження на один ступінь номінальні напруження змінювалися на величину  $\Delta\sigma = 20$  МПа. Час витримки на кожному ступені складав  $t = 20$  с.

Моделювання процесу укладання трубопроводу S-методом відбувалося шляхом одноциклового знакозмінного навантаження зразків, яке 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

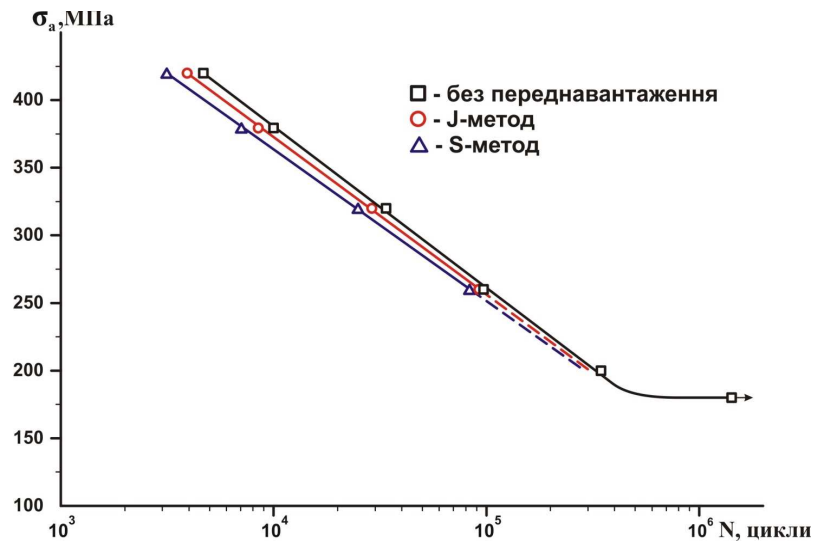


Рисунок 2 – Криві низькочастотної втоми сталі трубопроводу з переднавантаженням та без нього

зразки при моделюванні його процесу укладання S-методом.

На рис. 2 представлено криві низькочастотної втоми сталі трубопроводу з урахуванням передексплуатаційним навантажень в процесі укладання трубопроводу S- та J-методом та без них.

Як бачимо, переднавантаження знижує загальну довговічність сталі трубопроводу, причому негативний вплив переднавантаження із збільшенням рівня номінальних напружень посилюється. Якщо при  $\sigma_a = 260$  МПа в процесі укладання трубопроводу J- та S-методом довговічність зменшується в 1,12 та 1,22 разів (на 10,4% та 18,2%), а при  $\sigma_a = 320$  МПа – в 1,15 та 1,32 разів (на 12,7% та 24,3%), то при  $\sigma_a = 420$  МПа – в 1,19 та 1,5 разів (на 16,3% та 33,4%) відповідно. При цьому границя витривалості сталі 09Г2С на базі  $10^6$  циклів складає  $\sigma_{-1} = 180$  МПа.

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 випробувань 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 досліджень нами були побудовані кінетичні деформації зразків-моделей з переднавантаженням S- та J-методом та без нього для сталі трубопроводу (рис. 3, 4, 5). Тут  $N_i$  – кількість пройдених циклів навантаження,  $N$  – загальна довговічність.

Типовою для всіх випадків є тристадійна кінетика формування, для якої характерне інтенсивне циклічне зменшення на I-ій стадії, яке має затухаючий характер. Найтриваліша II-га стадія відповідає відносній стабілізації

амплітуди циклічної деформації  $\Delta\epsilon^H$ , яка зростає монотонно з постійною, проте незначною швидкістю. Наприкінці даної стадії в структурі сталі трубопроводу накопичується критичний ступінь пошкоджуваності (відбувається зародження мікротріщин). Подальше циклічне деформування на завершальній III-ій стадії пов'язане з прискореним ростом корозійно-втомних тріщин, формуванням та поширенням магістральної тріщини аж до початку остаточного руйнування зразка.

Для всіх досліджуваних амплітуд напружень  $\sigma_a$  фіксуємо істотні зміни у кінетиці деформації переднавантажених зразків. Зокрема, спостерігаємо зростання тривалості I-ої стадії низькочастотної втоми та збільшення амплітуди стабілізації циклічної деформації на початку II-ої стадії. Щоправда, для випадку навантаження до рівня 420 МПа спостерігається незначне зниження амплітуди стабілізації циклічної деформації на початку II-ої стадії.

Для сталі трубопроводу при переднавантаженні J-методом величина амплітуди стабілізації циклічної деформації порівняно зі звичайним навантаженням при випробуваннях на рівні напружень 260 та 320 МПа зростає відповідно на 15,6% та 18,6%, а при рівні напружень 420 МПа знижується на 15,1%. Для переднавантаження S-методом ця величина порівняно зі звичайним навантаженням при випробуваннях на рівні напружень 260 та 320 МПа зростає відповідно на 25,8% та 28,3%, а при рівні напружень 420 МПа – знижується на 23,9%. Така деформаційна поведінка сталі трубопроводу для області високих амплітуд напружень пояснюється вичерпанням ресурсу пластичності в процесі переднавантаження, що підтверджується збільшенням тривалості та характером перебігу III-ої стадії втоми, а саме – швидкою появою деформаційних стрибків, внаслідок поширення втомної тріщини.

Для кращого наочного представлення впливу переднавантаження на рівень деформації сталі трубопроводу за результатами втомних

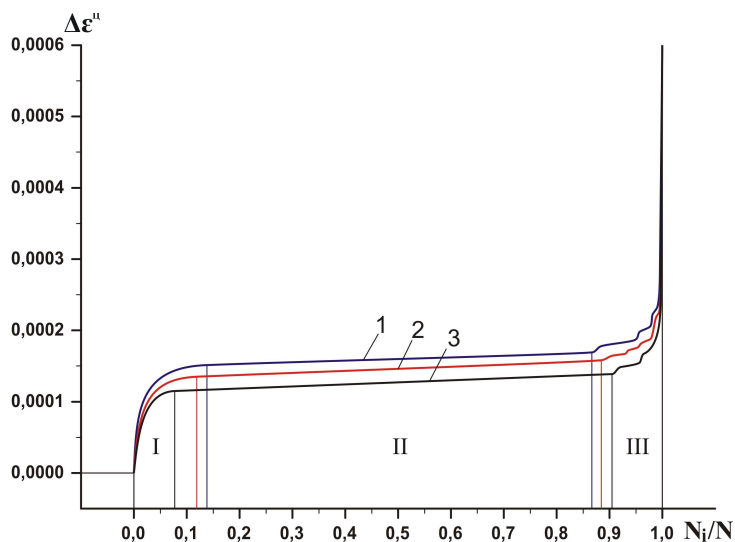


Рисунок 3 – Кінетичні криві деформування сталі трубопроводу за амплітуди напружень 260 МПа з переднавантаженням S-методом (1), J-методом (2) та без нього (3)

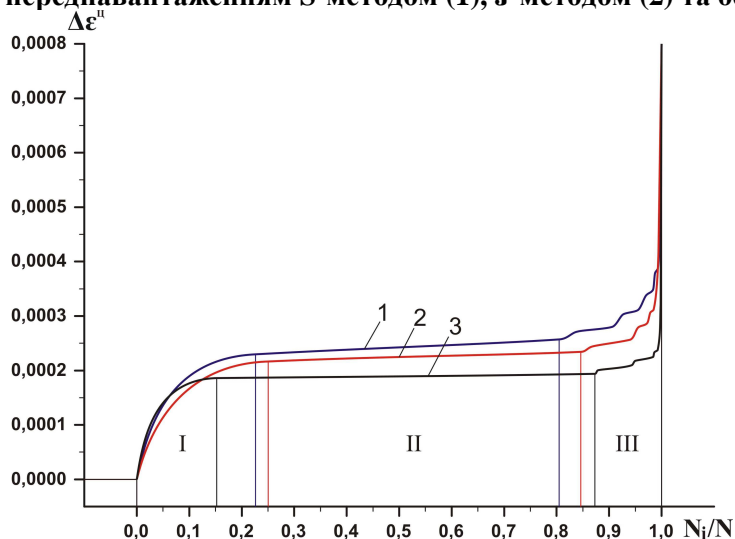


Рисунок 4 – Кінетичні криві деформування сталі трубопроводу за амплітуди напружень 320 МПа з переднавантаженням S-методом (1), J-методом (2) та без нього (3)

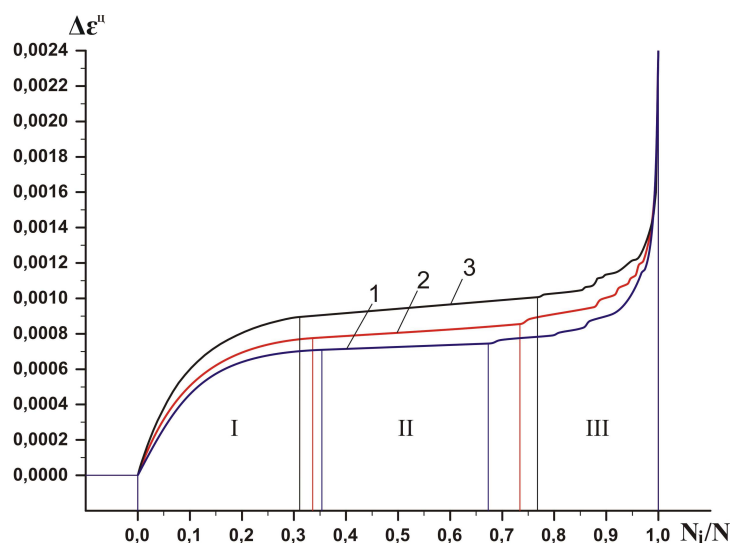


Рисунок 5 – Кінетичні криві деформування сталі трубопроводу за амплітуди напружень 420 МПа з переднавантаженням S-методом (1), J-методом (2) та без нього (3)

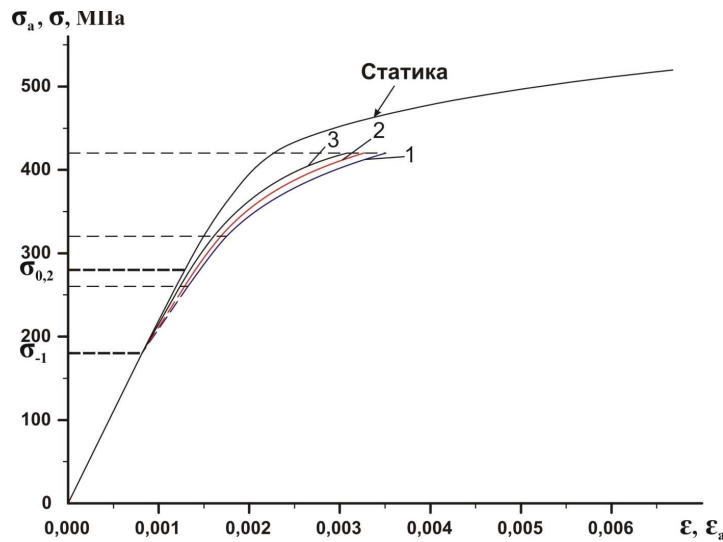


Рисунок 6 – Діаграма циклічного кругового згину сталі трубопроводу з переднавантаженням S-методом (1), J-методом (2) та без нього (3)

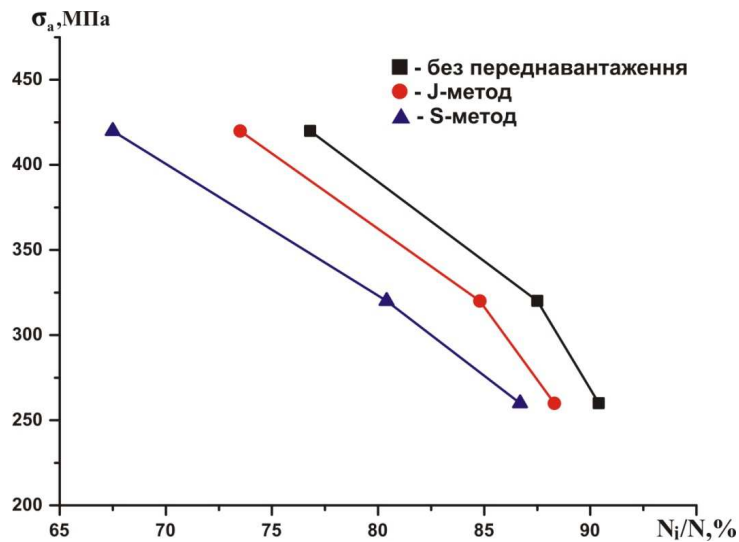


Рисунок 7 – Вплив переднавантаження на ресурс безпечної експлуатації сталі трубопроводу

випробувань побудовано діаграми циклічного кругового згину (рис. 6). Вони вказують на відчутний приріст циклічної деформації у переднавантажених зразках, що призводить до вичерпання ресурсу пластичності металу і, як наслідок, до зменшення ресурсу безпечної експлуатації. Використання таких діаграм при проектуванні морських трубопроводів дасть змогу коректніше оцінювати рівень циклічної деформації в процесі експлуатації та оптимізувати режими перекачування транспортованого продукту.

На останньому етапі досліджень проведено оцінку впливу передексплуатаційних навантажень на ресурс безпечної експлуатації трубопроводу, який відповідає тривалості першої та другої стадій низькочастотної втоми, тобто дорівнює діапазону від початку втоми до переходу в стадію прискореного росту втоми тріщини. Як видно з одержаних результатів (рис. 7), передексплуатаційні навантаження зменшують ресурс безпечної експлуатації сталі морських трубопроводів при укла-

данні S-методом від 3,7% до 9,3%, а при укладанні J-методом – від 2,1% до 3,3%, причому із збільшенням амплітуди напружень негативний вплив переднавантаження істотно зростає.

Така поведінка сталі трубопроводу вимагає особливо ретельного вивчення, оскільки її необхідно враховувати при проектуванні та експлуатації глибоководних трубопроводів, адже саме із збільшенням глибини укладання зростають передексплуатаційні навантаження, а також підвищується ризик пошкодження ізоляційного покриття і, як наслідок, поява та розвиток корозійних та корозійно-втомних уражень. Тому в подальших дослідженнях необхідно детально вивчити корозійну та корозійно-втомну поведінку сталі трубопроводу у морській воді для одержання цілісної картини впливу навантажень в процесі будівництва на ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів. Такі дослідження особливо актуальні ще й з огляду на те, що на великих глибинах пролягання траси трубопроводу проведення ремонтних заходів істотно утруднене або ж невиправдано вартісне.

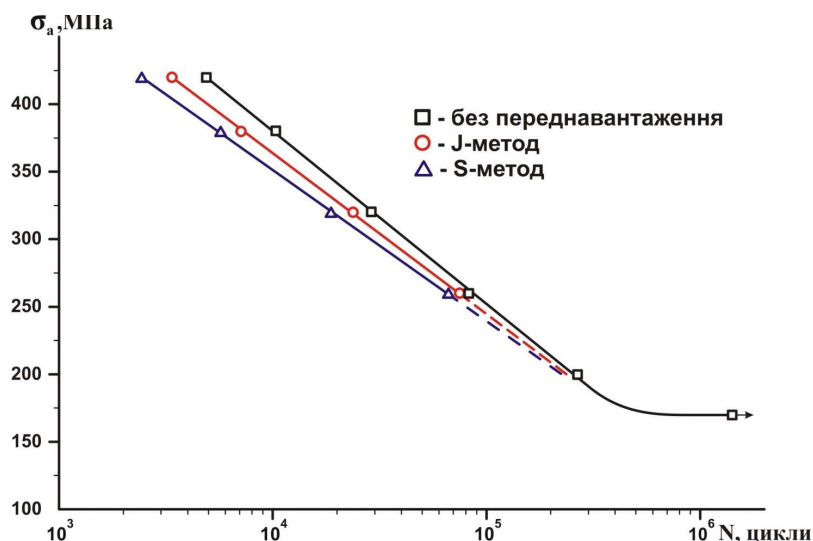


Рисунок 8 – Криві низькочастотної втоми зварного з'єднання трубопроводу з переднавантаженням та без нього

В процесі вивчення довговічності та ресурсу безпечної експлуатації морських трубопроводів розрахунок останнього за характеристиками винятково матеріалу лінійної частини труби був би сумнівним чи навіть некоректним. Відомо, що більшість втомних та корозійно-втомних руйнувань виникає в околі зварного шва, оскільки його композитна структура “зварний шов – зона термічного впливу” (ЗШ-ЗТВ) сама по собі збільшує ризик виникнення пошкоджень внаслідок структурної негомогенності [4].

При укладанні морських трубопроводів процес зварювання є провідним технологічним процесом, що визначає терміни будівництва, герметичність і міцність конструкції трубопроводу [5]. Тому порушення вимог технологічного процесу зварювання можуть викликати зниження механічних характеристик зварного з'єднання порівняно металом лінійної частини трубопроводу, внаслідок збільшення кількості втомних пошкоджень та швидкості росту тріщин. В зв'язку з цим виникає потреба у комплексних дослідженнях композиції ЗШ-ЗТВ як слабкої ланки трубопровідної системи в умовах низькочастотного навантаження, з метою коректного прогнозування її втомного ресурсу.

Втомні випробовування на повітрі ( $T = 293 \text{ K}$ ) з частотою навантаження  $0,8 \text{ Гц}$  проводили на коротких зразках-моделях з  $l_p/d = 4$ , в яких зварний шов розташований посередині робочої частини зразка.

Одержані криві втоми, побудовані з урахуванням передексплуатаційних навантажень в процесі укладання трубопроводу S- та J-методом та без такого, свідчать, що зварне з'єднання характеризується нижчою втомною довговічністю порівняно з основним металом (рис. 8). Однією з основних причин цього є велика ймовірність наявності в композиції ЗШ-ЗТВ неоднорідностей, таких як включення, порожнини тощо, які впливають на кінетику деформації та зародження тріщин. Інша причина полягає в тому, що нагрівання та охоло-

дження під час зварювання викликає появу залишкових напружень, які спричиняють збільшення кількості втомних пошкоджень та швидкості росту тріщин.

Крім того, переднавантаження більш суттєво знижує загальну довговічність зварного з'єднання порівняно з основним металом. Якщо при  $\sigma_a = 260 \text{ МПа}$  в процесі укладання трубопроводу J та S-методом довговічність зменшується в 1,18 та 1,32 разів (на 14,9% та 24,1%), а при  $\sigma_a = 320 \text{ МПа}$  – в 1,27 та 1,54 разів (на 21,1% та 35,2%), то при  $\sigma_a = 420 \text{ МПа}$  – в 1,44 та 2,01 разів (на 30,6% та 50,1%) відповідно. Крім того, границя витривалості зварного з'єднання на базі  $10^6$  циклів дещо менша від такої для основного металу і складає  $\sigma_{-1} = 170 \text{ МПа}$ . Така тенденція підтверджує тезу про найбільший ризик виникнення пошкоджень, відмов чи позаштатних ситуацій під час експлуатації трубопроводу саме в області зварного шва.

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 (рис. 9, 10, 11). Зокрема збільшується, порівняно з основним металом, тривалість третьої стадії, що призводить, як наслідок, до більш інтенсивного зменшення ресурсу безпечної експлуатації. Для зварного з'єднання порівняно з основним металом у переднавантажених зразках для всіх досліджуваних амплітуд напружень спостерігається зниження тривалості I-ої стадії низькочастотної втоми, особливо значне для переднавантаження S-методом при 260 та 320 МПа. При цьому зберігається характерне для кінетики циклічного деформування основного металу збільшення амплітуди стабілізації циклічної деформації на початку II-ої стадії при 260 та 320 МПа та її незначне зменшення при 420 МПа. Для випадку попереднього переднавантаження J-методом величина амплітуди стабілізації циклічної деформації порівняно

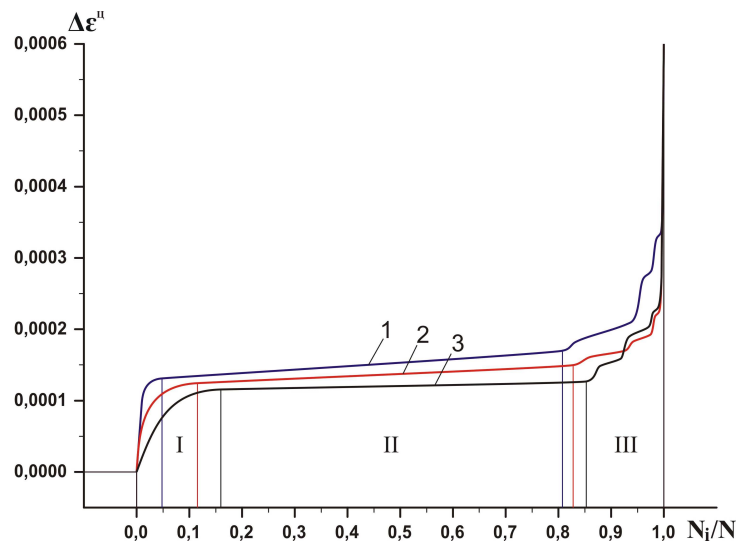


Рисунок 9 – Кінетичні криві деформації зварного з'єднання за амплітуди напружень 260 МПа з переднавантаженням S-методом (1), J-методом (2) та без нього (3)

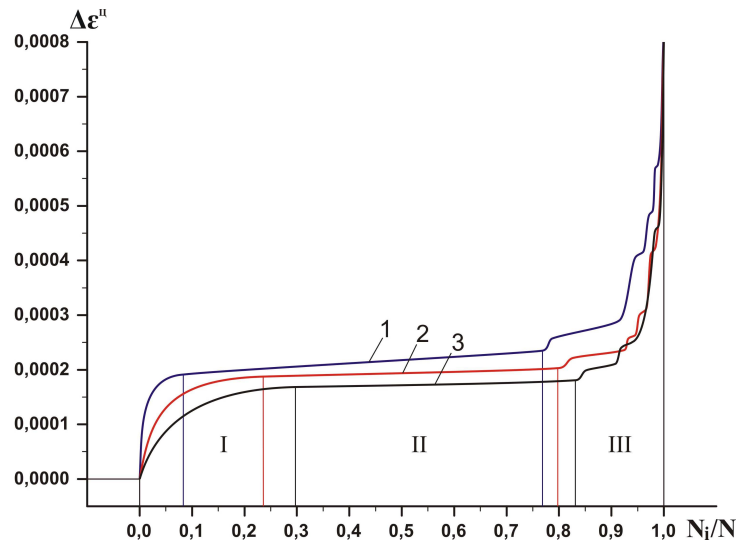


Рисунок 10 – Кінетичні криві деформації зварного з'єднання за амплітуди напружень 320 МПа з переднавантаженням S-методом (1), J-методом (2) та без нього (3)

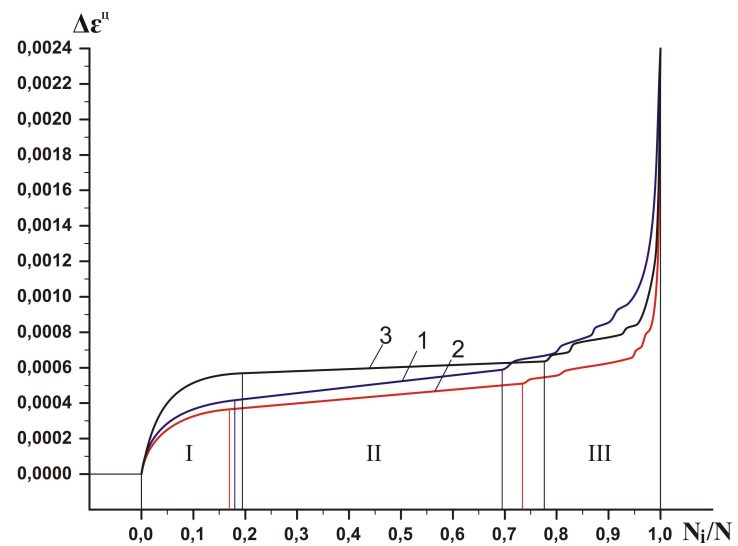


Рисунок 11 – Кінетичні криві деформації зварного з'єднання за амплітуди напружень 420 МПа з переднавантаженням S-методом (1), J-методом (2) та без нього (3)

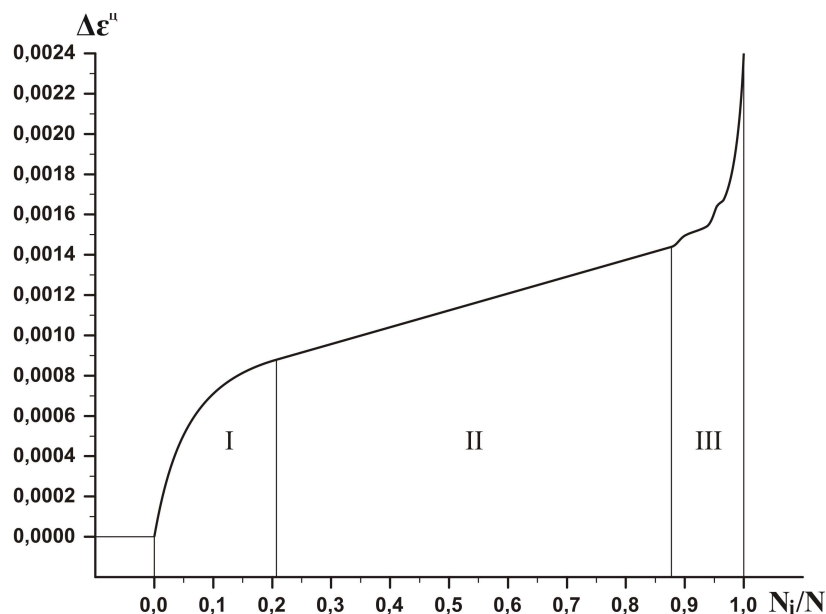


Рисунок 12 – Аномальна деформаційна поведінка переднавантажених зразків зварного з'єднання (420 МПа)

зі звичайним навантаженням при випробуваннях на рівні напружень 260 та 320 МПа зростає відповідно на 13,1% та 11,9%, а при рівні напружень 420 МПа – знижується на 26,7%. Для випадку попереднього переднавантаження S-методом ця величина порівняно зі звичайним навантаженням при випробуваннях на рівні напружень 260 та 320 МПа зростає відповідно на 24,6% та 22,3%, а при рівні напружень 420 МПа – знижується на 16,7%. Крім того, зварне з'єднання характеризується більш інтенсивним пластичним деформуванням, про що свідчить більша швидкість приросту амплітуди циклічної деформації на II-й стадії, яка для основного металу залишається практично незмінною. Це, в свою чергу, зумовлює менший ресурс та безпечний ресурс експлуатації зварного з'єднання порівняно з основним металом. Нижчі порівняно з основним металом значення амплітуди стабілізації циклічної деформації для зварного шва можна пояснити масштабним фактором.

В процесі втомних випробувань зразків зварного з'єднання виявилася досить небезпечна тенденція: зафіксовано аномальну деформаційну поведінку частини зразків з кожної партії. Вона проявляється у відсутності стабілізації деформації на II-й стадії, внаслідок чого практично від самого початку II-ої стадії зразки переходять в область швидкого росту втомної тріщини (рис. 12). Порівняльний аналіз (рис. 11, 12) вказує на приріст амплітуди циклічної деформації до 2,5...3 разів. Зменшення загальної довговічності та ресурсу безпечної експлуатації становить 1,8...2,3 рази. Причому, слід зазначити, 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.

Щоб уникнути виникнення цього небезпечного явища, матеріали, що використовуються при зварюванні морських трубопроводів, повинні забезпечувати наступне:

- рівномірність зварного шва та основного металу труби по границі міцності, плинності та витривалості;
- відсутність у металі шва і зоні термічного впливу “гарячих” та “холодних” тріщин;
- отримання зварних швів без шлакових включень, газових пор, підрізів та інших дефектів;
- отримання технологічним шляхом профілю зварного шва з плавним переходом до основного металу труби;
- відсутність навіть незначного непровару в корені стикового шва.

За результатами втомних випробувань побудовано діаграми циклічного кругового згину для зразків зі зварного з'єднання (рис. 13). З неї випливає, що максимальний приріст циклічної деформації спостерігається для зразків, переднавантажених S-методом. Для випадку із J-методом такий приріст дещо менший. Така залежність пояснюється проявом ефекту Баушінгера при квазістатичному навантаженні за схемою S-методу.

Аналіз одержаних результатів свідчить (рис. 14), що передексплуатаційні навантаження зменшують ресурс безпечної експлуатації зварного з'єднання морських трубопроводів при укладанні S-методом від 4,2% до 7,9%, а при укладанні J-методом – від 2,3% до 4,1%.

Для зразків зварного з'єднання, як і для зразків основного металу, із зростанням амплітуди напружень спостерігається збільшення негативного впливу переднавантаження на залишковий ресурс безпечної експлуатації. Такий вплив механічного чинника, крім того, викликає у випадку зварного з'єднання ще й зменшення ресурсу безпечної експлуатації порівня-



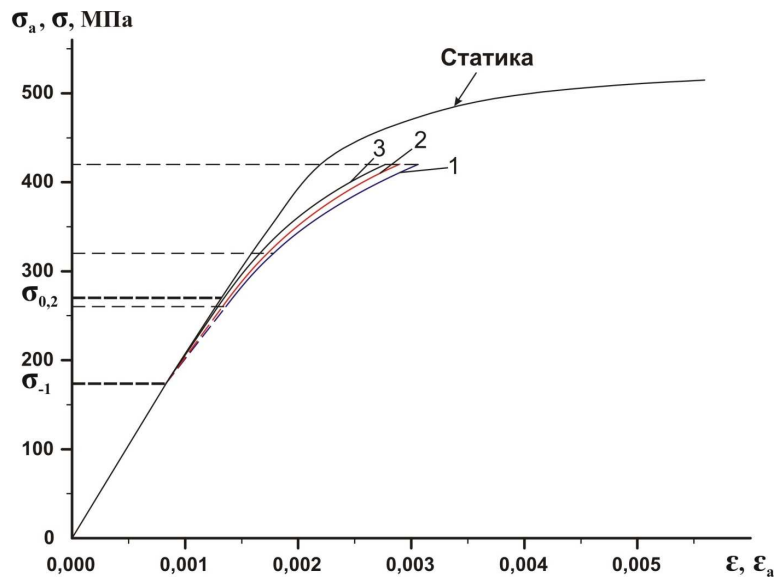


Рисунок 13 – Діаграма циклічного кругового згину зварного з’єднання з переднавантаженням S-методом (1) та J-методом (2) та без нього (3)

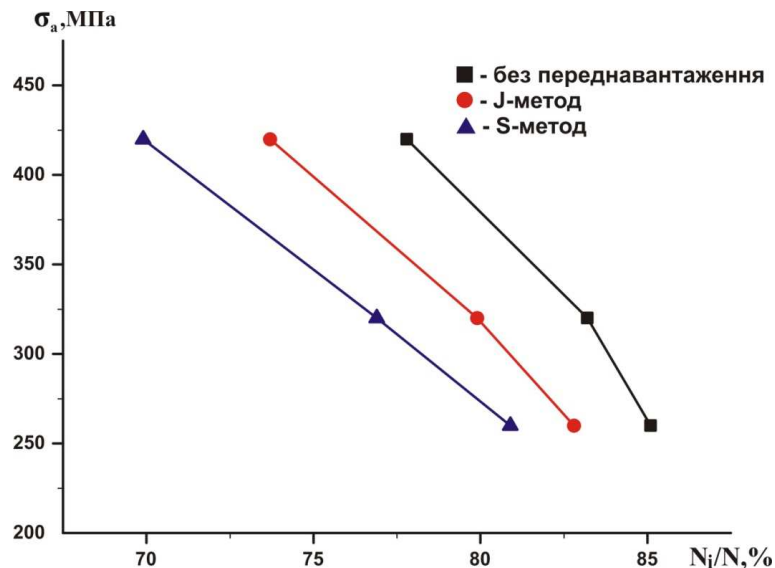


Рисунок 14 – Вплив переднавантаження на ресурс безпечної експлуатації зварного з’єднання

но з основним металом. Така тенденція пояснюється неомогенністю та підвищеним ризиком дефектності матеріалу трубопроводу в області зварного з’єднання.

### Висновки

На експериментальних зразках матеріалу морського трубопроводу змодельовано процес його укланання на дно моря S та J-методами.

Досліджено вплив передексплуатаційних навантажень у процесі укладання трубопроводу на довговічність основного металу та зварного з’єднання труб.

Вивчено вплив переднавантаження на деформаційну поведінку матеріалу лінійної частини та зварного з’єднання трубопроводу.

Побудовано кінетичні криві деформації та діаграми циклічного кругового згину для зразків основного металу та зварного з’єднання.

Встановлено деякі закономірності впливу рівня механічних напружень та передексплуатаційних навантажень на ресурс безпечної експлуатації морських трубопроводів і доведено необхідність урахування передексплуатаційних навантажень при встановленні ресурсу роботи та залишкового ресурсу безпечної експлуатації морських трубопроводів.

### Література

1 Бошкова І.Л. Трубопроводный транспорт и переработка продукции морских скважин: учебное пособие / И.Л. Бошкова. – О.: Одесская государственная академия холода, 2010. – 144 с.

2 Бородавкин П.П. Морские нефтегазовые сооружения: Учебник для вузов. Часть 2. Технология строительства / П.П. Бородавкин. – М.: ООО Недра-Бизнесцентр, 2007. – 408 с.: ил.

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

4 Труфяков В.И. Усталость сварных соединений / В.И. Труфяков. – К.: Наукова думка, 1973. – 216 с.

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

*Стаття надійшла до редакційної колегії*

*27.08.12*

*Рекомендована до друку професором  
Грудзом В.Я.*