

УДК 622.691.4

Л. Побережний, докт. техн. наук; Т. Пиріг

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ВПЛИВ СПОСОБУ УКЛАДАННЯ НА РЕСУРС БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОРСЬКИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Резюме. Досліджено вплив знакозмінного переднавантаження на механічні властивості трубної сталі. Побудовані кінетичні криві деформації при знакозмінному переднавантаженні та без нього при низькочастотній малоцикловій втомі з метою кращого прогнозування ресурсу безпечної експлуатації морських трубопроводів.

Ключові слова: знакозмінне переднавантаження, петля механічного гістерезису, низькочастотна малоциклова втома, кінетична крива деформації.

L. Poberezhny, T. Pyrig

IMPACT OF METHOD OF OFFSHORE PIPELINES LAYING ON ITS SAFE PERFORMANCE PERIOD

The summary. The influence of alternating preload on the mechanical properties of steel pipe is investigated. Kinetic curves of deformation for the alternating preload and without it at low-frequency low-cycle fatigue is constructed in order to better forecasting of resource safe operation of offshore pipelines.

Key words: alternating preload, mechanical hysteresis loop, low-frequency low-cycle fatigue, kinetic curves of deformation.

Постановка проблеми. Незважаючи на значні успіхи в проектуванні та розрахунку морських трубопровідних систем, деякі питання розрахунку трубопроводів, які прокладаються на значних глибинах, і для трубопроводів великого діаметра, які укладають з судна-трубоукладача, залишаються невирішеними до сьогодні. В першу чергу, до таких питань відносяться питання розрахунку напружено-деформованого стану (НДС) піднятої та провисаючої частини трубопроводу, тобто тієї його частини, яка починається від точки відриву труби з дна моря і закінчується на судні-трубоукладачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні у світовій практиці існують три найпоширеніші способи прокладання морських трубопроводів: S-метод, J-метод та барабанний метод.

Традиційний спосіб прокладання морських трубопроводів на відносно невеликих глибинах називається S-методом (рис. 1), оскільки профіль труби від місця зварювання й станції технічного контролю на кормі баржі-трубоукладача і до морського дна набуває форми витягнутої S-подібної кривої. Така форма досягається шляхом використання шарнірного криволінійного стінгера (фермоподібна конструкція) та натяжної талевої системи, яка здатна створювати максимальне розтягуюче зусилля

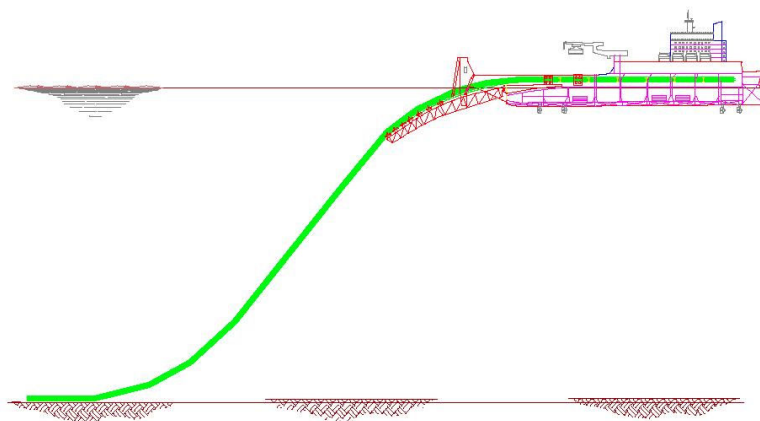


Рисунок 1. Прокладання трубопроводу S-методом

величиною до 30 кН. Вони призначені для мінімізації радіуса кривизни і, відповідно, згинальних напружень по всій довжині провисаючої ділянки трубопроводу.

Сучасні трубоукладальні судна, які працюють за S-методом, здатні прокласти трубопроводи діаметром до 1420 мм (56 дюймів) на глибину до 300 м, а діаметром до 810 мм (32 дюйми) – на глибину до 700 м зі швидкістю 3-5 км/добу [1].

Мета роботи. Провести деформаційно-кінетичний аналіз процесу укладання трубопроводу S-методом з використанням експериментальних досліджень умов переходу від статичного до квазістатичного навантаження при знакозмінному циклі та від квазістатичного до низькочастотного навантаження, яке проявляється після укладання трубопроводу.

Методику дослідження. Для вивчення поведінки матеріалу трубопроводу (сталь 09Г2С) у циклі укладання та в області низькочастотної втоми використовували циліндричні зразки-моделі з $l_p/d = 10$, які випробовували за розробленою методикою на установці МВ-1К [2].

Імітацію процесу укладання трубопроводу S-методом проводили на зразках-моделях шляхом ступінчастого навантаження за прискореною методикою. При збільшенні чи зменшенні навантаження на один ступінь номінальні напруження змінювалися на величину $\Delta\sigma = 20$ МПа за час $t_{n(p)} = 1$ с. Час витримки на кожному ступені $t_g = 20,14$ с, а сумарний час $\Delta t = t_{n(p)} + t_g = 21,14$ с. Вибір амплітуди напруження $\sigma_a = 420$ МПа зроблено, виходячи з висновків роботи [3].

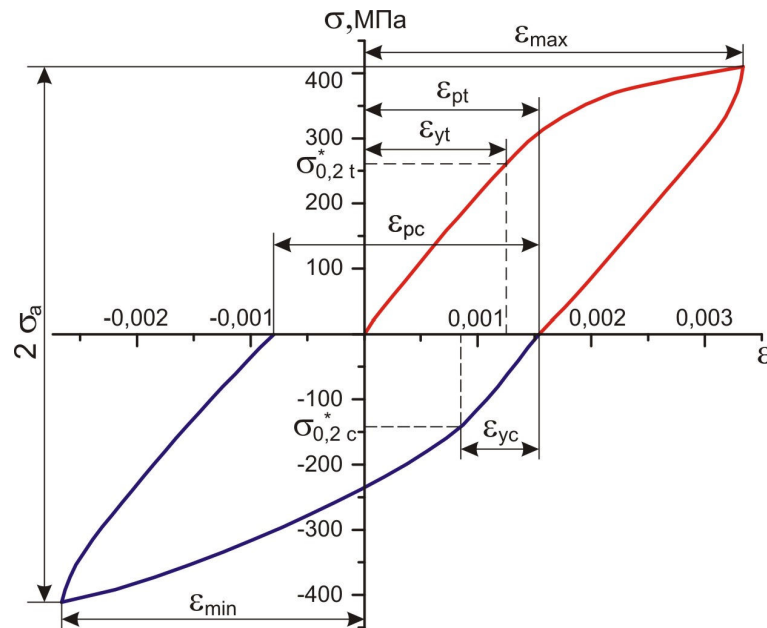
Результати досліджень. Аналіз циклу деформацій показує, що в умовах квазістатичного навантаження до 420 МПа низькотемпературна логарифмічна повзучість за час t_g відчутно проявляється при напруженнях, більших за границю текучості $\sigma_{0,2}^*$, визначеної за розробленою методикою [4]. В першому півциклі границя текучості $\sigma_{0,2 t}^* = 260$ МПа, а в другому – $\sigma_{0,2 c}^* = 140$ МПа і тому можна казати про яскравий прояв квазістатичного ефекту Баушінгера та пов'язане з цим значне зниження $\sigma_{0,2}^*$ сталі. Силовий та деформаційний критерії оцінки ефекту Баушінгера дорівнюють відповідно $\sigma_{0,2 c}^* / \sigma_{0,2 t}^* \approx \varepsilon_{yc} / \varepsilon_{yt} = 0,54$. Напруженням $\sigma_{0,2 t}^*$ та $\sigma_{0,2 c}^*$ відповідають

деформації ε_{yt} та ε_{yc} , які визначаються ще до відтворення повної петлі гістерезису.

Деформаційні відмінності при навантаженні та розвантаженні, а також наявність зсуву фаз між σ та ε , в кінцевому результаті спричиняють утворення петлі механічного гістерезису (рис. 2 а). Така діаграма, на відміну від діаграми розтягу, дозволяє прогнозувати деформаційну поведінку матеріалу трубопроводу в циклі укладання та визначати необхідні для коректного розрахунку НДС параметри, а саме: ε_{\max} , ε_{\min} – максимальну і мінімальну деформації при розмаху напружень циклу $2\sigma_a$; ε_{yt} , ε_{yc} – деформації, що відповідають напруженням $\sigma_{0,2t}^*$ та $\sigma_{0,2c}^*$; ε_{pt} , ε_{pc} – ширину петлі гістерезису в першому (непарному) та другому (парному) півциклах.

Оскільки діаграма знаковмінного одноциклового згину (петля гістерезису) побудована за точками, що відповідають значенням ε після витримки при заданих σ , тобто з урахуванням повзучості, можна також визначати релаксовані модулі пружності E_r , і пластичності E_{pr} та нерелаксований модуль розвантаження E_d . Чутливішим до повзучості буде параметр E_{pr} . Оскільки процес низькотемпературної повзучості трубної сталі носить затухаючий характер, можна зробити важливий практичний висновок, що із подальшим збільшенням t_θ розмах деформації змінюватиметься незначно.

Наведені в таблиці 1 характеристики трубної сталі (абсолютні величини) для першого та другого півциклів показують, що в інженерних розрахунках НДС можна використовувати прийнятну нами петлю гістерезису (рис. 2 б), яка складається з прямолінійних похилих ділянок.



а

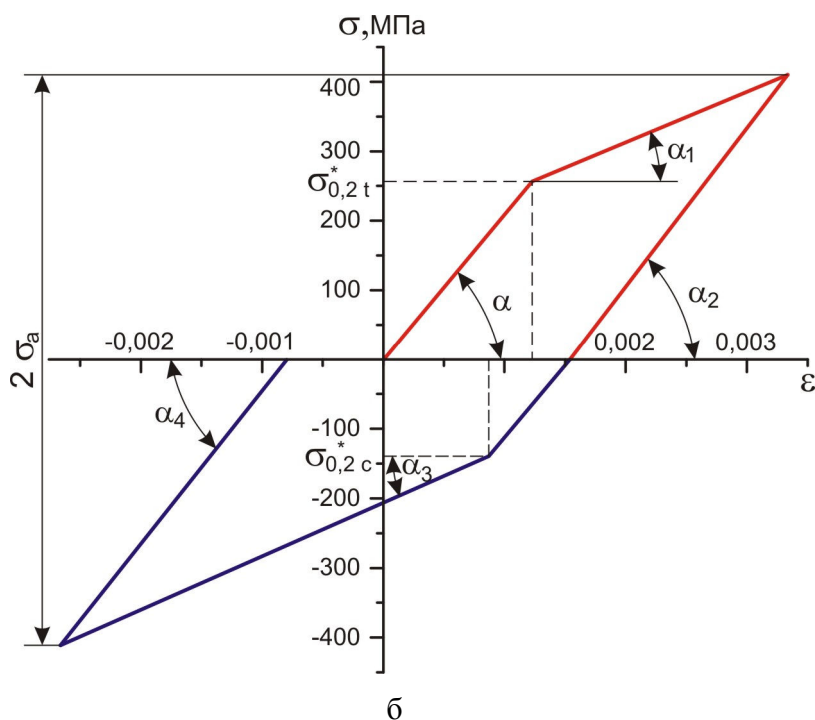


Рисунок 2. Експериментальна (а) та прийнята (б) діаграми знакозмінного одноциклового згину для сталі 09Г2С

Значення $tg \alpha = E_{rt}$, $tg \alpha_1 = E_{prt}$, $tg \alpha_2 = E_{dt}$, $tg \alpha_3 = E_{prc}$, $tg \alpha_4 = E_{dc}$, де E_{prt} і E_{prc} – релаксовані модулі пластичності, а E_{dt} і E_{dc} – нерелаксовані модулі розвантаження відповідно для першого та другого півциклів, а також координати характерних точок беруться з експериментальної петлі гістерезису.

Після укладання трубопроводу метал під ізоляційним покриттям в умовах експлуатації піддаватиметься низькочастотній втомі, яка залежно від амплітуди напружень чи деформацій, може бути малоцикловою та багатоцикловою. Тому ми провели експериментальні дослідження з метою виявлення впливу попереднього квазістатичного навантаження зі знакозмінним циклом на втомну довговічність сталі 09Г2С при частоті навантаження 0,8 Гц в середовищі повітря.

Таблиця 1. Розрахункові характеристики сталі 09Г2С для першого та другого півциклів

№ пів-циклу, індекс	$\sigma_{0,2}^*$	E_r	E_{pr}	E_d	ϵ_{max}	ϵ_{min}	ϵ_y	ϵ_p
	МПа							
1 (t)	260	209401	72754	228009	0,00334	-	0,00123	0,00154
2 (c)	140	208843	76847	220057	-	0,00266	0,00067	0,00233

Для $\sigma_a = 420$ МПа були побудовані кінетичні криві деформації зразків-моделей з одноцикловим знакозмінним переднавантаженням (рис. 3 а) та без нього (рис. 3 б) при низькочастотній малоцикловій втомі з наступним скануванням втомних зламів.

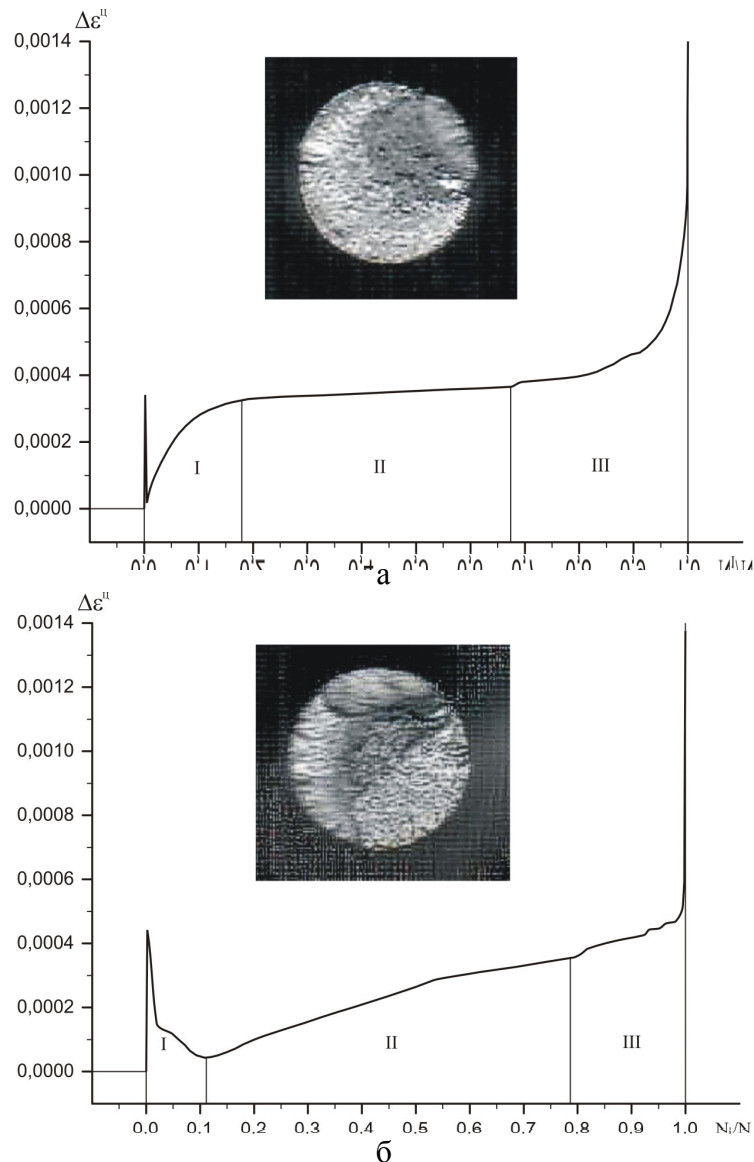


Рисунок 3. Зміна амплітуди пластичної деформації зразків-моделей з одноцикловим знакозмінним переднавантаженням (а) та без нього (б) сталі 09Г2С при 420 МПа

На рис. 3 N_i/N – рівень накопичених втомних пошкоджень, де N_i – кількість пройдених циклів навантаження, N – загальна довговічність. Типовою для обидвох випадків є тристадійна кінетика деформування з характерними деформаційними піками на 1-ій стадії, зумовленими послідовним проходженням інтенсивних, швидкоплинних процесів циклічного знеміцнення та зміцнення, після яких відбувається повторне знеміцнення сталі, що носить затухаючий характер. Найтриваліша 2-га стадія відповідає стабілізації амплітуди циклічної деформації ϵ_a . Щоправда, для зразків-моделей без попереднього переднавантаження стабілізація відбувається в два етапи. На завершальній 3-й стадії відбувається прискорений ріст втомних тріщин аж до початку остаточного руйнування.

Відносна тривалість стадій залежить від амплітуди напружень і при $\sigma_a = 420$ МПа для зразків-моделей без попереднього переднавантаження відповідно складає 11,19 (I), 67,47 (II) та 21,34 % (III) від загальної довговічності. Після попереднього знакозмінного переднавантаження при аналогічному рівні σ_a відносна тривалість усіх трьох стадій змінюється таким чином: для I-ї стадії вона складає 17,85, для II-ї – 49,54, для III-ї – 32,61%.

Висновки. Як бачимо з отриманих результатів, при попередньому знакозмінному переднавантаженні, яке імітує процес укладання S-методом, ресурс безпечної експлуатації трубопроводу, який відповідає I-ій та II-ій стадіям низькочастотної втоми, зменшується з 78,66 до 67,39, тобто на 11,27%. Це свідчить про необхідність урахування передексплуатаційних навантажень та впливів при проектуванні й оцінюванні ресурсу (залишкового ресурсу) безаварійної експлуатації морських трубопроводів.

Література

1. Горяинов, Ю.А. Морские трубопроводы [Текст] / Ю.А. Горяинов, А.С. Федоров, Г.Г. Васильев и др. – М.: Недра, 2001. – 131 с.
2. Крижанівський, Є.І. Установа для комплексних досліджень малоциклової втоми матеріалу морських трубопроводів у робочих середовищах [Текст] / Є.І. Крижанівський, Л.Я. Побережний // Нафт. і газова пром-сть. – 2001. – № 5. – С. 44–45.
3. Капустин, К.Я. Строительство морских трубопроводов [Текст] / К.Я. Капустин, М.А. Камышев – М.: Недра, 1982. – 207 с.
4. Побережний, Л.Я. Закономірності деформації і руйнування морських трубопроводів при статичному та низькочастотному навантаженні: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.13 / Івано-Франківський національний техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2002. – 19 с.