

УДК 621.643

## КІНЕТИКА ДЕФОРМАЦІЇ СТАЛІ ТРУБОПРОВОДУ ПРИ НИЗЬКОЧАСТОТНОМУ НАВАНТАЖЕННІ У МОРСЬКІЙ ВОДІ

Є.І.Крижанівський, Л.Я.Побережний

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 42264,  
e-mail: rector@ifdtung.if.ua

*Изучена кинетика деформации трубной стали 20 с текстурированными компонентами при низкочастотном нагружении в морской воде. Обнаружено аномальное деформационное поведение стали в области высоких амплитуд напряжений.*

*Kinetic of deformation of pipeline steel 20 with textured components under low frequency loading in sea water was investigated. Anomalous deformation behaviour of pipeline steel in high strain amplitudes was discovered.*

В процесі тривалої експлуатації морських трубопроводів (30 років і більше), що проходить у постійній взаємодії з морським середовищем, відбувається закономірна зміна напружено-деформованого стану несучих елементів при найрізноманітніших комбінаціях статичних та динамічних силових факторів і впливів [1].

Особливої актуальності набувають дослідження низькочастотної мало- та багатоциклової корозійної втоми, а також статичні випробовування з урахуванням фактора часу, в яких використовуються експериментальні зразки-моделі, виготовлені із заготовок, вирізаних зі стінки труби [2]. Методику випробовувань докладно описано в [3].

Мета даної роботи – вивчити деформаційну поведінку трубної сталі 20 з текстурованими компонентами (витягнутими в напрямі прокатки труб зернами фериту та перліту [4]) при низькочастотному (0,8 Гц) навантаженні у морській воді.

Криві корозійної втоми трубних сталей не розкривають стадійності цього складного процесу, що не дає змоги достатньо точно прогнозувати ресурс роботи, залишковий ресурс роботи, ресурс роботи конструкції з моменту пошкодження покриття.

Встановлено, що морська вода при амплітуді напружень  $\sigma_a = 420$  МПа (верхня границя області малоциклової втоми) дещо знижує порівняно з повітрям [5] довговічність сталі, проте п'ятистадійна кінетика деформації з характерним піком залишається (рис. 1).

Параметри деформаційних піків, сформованих протягом I та II стадій, у морській воді та повітрі різні (рис. 2). Висота піку у морській воді відчутно більша, ніж у повітрі, що можна пов'язати з адсорбційним впливом електроліту (ефект Ребіндера) [6] на швидкоплинне протікання процесів циклічного знеміцнення на I стадії (діл. АВ) та циклічного зміцнення на II стадії (діл. ВС) в сприятливих умовах низькочастотного навантаження. В результаті вихід на ділянку CD (початок повторного деформаційного знеміцнення на III стадії) в корозійному середовищі відбувається при амплітуді пластичної деформації  $\Delta\varepsilon^p$  приблизно в чотири рази більший, ніж в повітрі (рис. 2). Судячи з нахилу

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

Незважаючи на те, що перші сліди корозії на поверхні зразка з'являються приблизно через 50 циклів навантаження, тобто на III стадії, вплив корозійного фактора на деформаційні зміни протягом IV стадії виражений слабо. Якщо на повітрі ця найтриваліша стадія протікає з практично незмінною амплітудою деформації  $\varepsilon_a$  [5], то в корозійному середовищі спостерігається незначне, але стабільне повторне деформаційне зміцнення (рис. 1) протягом приблизно 1500 циклів, після якого  $\Delta\varepsilon^p$  поступово стабілізується і, починаючи з  $\sim 2000$  циклів, аж до початку V стадії  $\Delta\varepsilon^p = \text{const}$ .

На V стадії прискорене зростання корозійно-втомних тріщин, як і втомних тріщин у повітрі, призводить до формування подібних поверхонь зламів (рис. 1), оскільки корозійне середовище найсильніше впливає на процес зародження тріщин, а зростання тріщин контролює напруження.

При зменшенні  $\sigma_a$  до 380 МПа дія морської води порівняно з повітрям проявляється в тому, що п'ятистадійна кінетика деформації трансформується у тристадійну (рис. 3, а), тобто зникають деформаційні піки, а циклічне знеміцнення стає довготривалим процесом, що охоплює I та II стадії. Швидкість збільшення  $\Delta\varepsilon^p$  на I стадії носить затухаючий характер, а на II стадії практично залишається постійною до початку III стадії.

Відносна тривалість стадій залежить від амплітуди напружень і при  $\sigma_a = 380$  МПа відповідно становить 13,85 (I), 71,96 (II) та 14,19% (III) від загальної довговічності  $N = 7400$  циклів. При зменшенні  $\sigma_a$  від 420 до 380 МПа відносна тривалість завершальних III та V стадій зростає; на повітрі така залежність не спостерігається [5].

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

При  $\sigma_a = 310$  МПа пластична складова деформації в статистиці вже незначна, оскільки умовна границя текучості при ступінчастому нава-

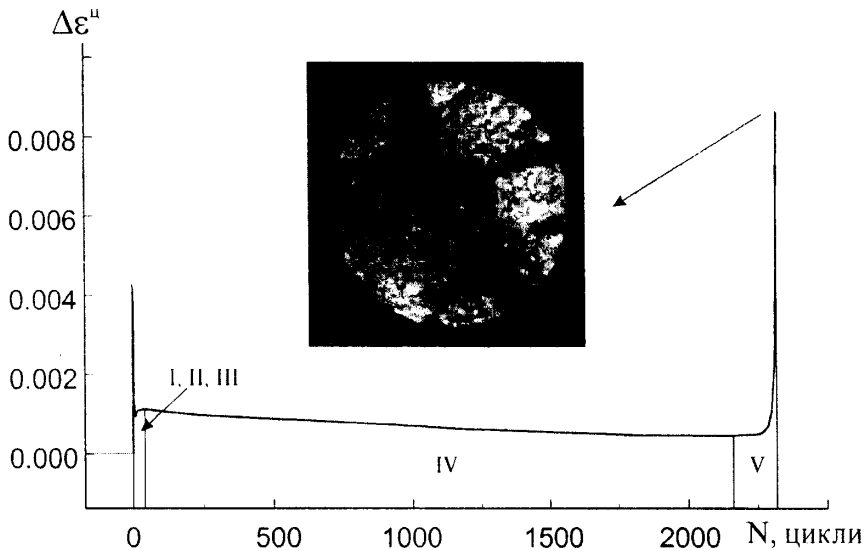


Рисунок 1 — Аномальна деформаційна поведінка текстурованої сталі трубопроводу при низькочастотній корозійній втомі ( $\sigma_a = 420$  МПа)

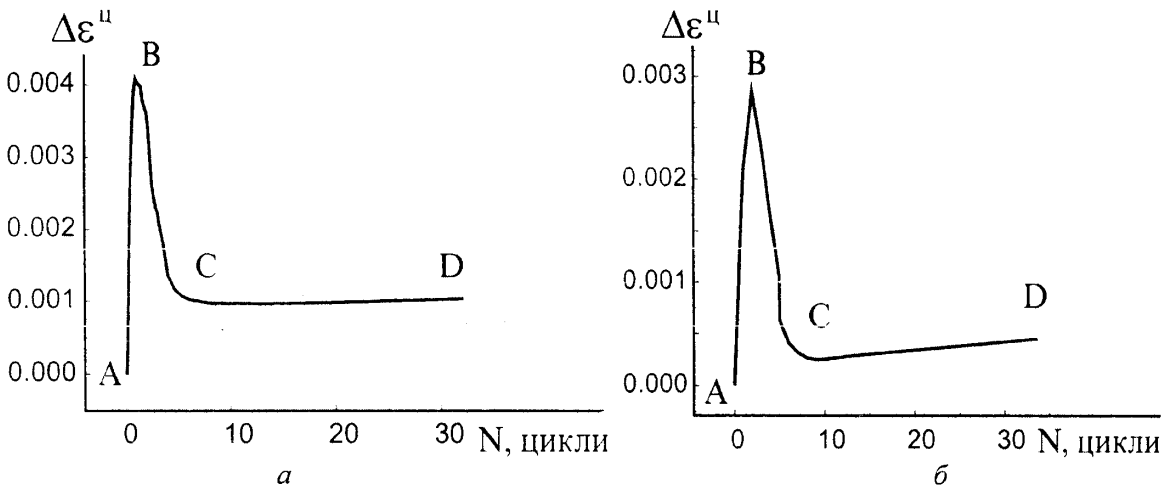


Рисунок 2 — Деформаційні піки у морській воді (а) та повітрі (б)

нтаженні чистим згином  $\sigma_{0,2}^* = 273$  МПа [4], і тому приріст  $\Delta\varepsilon^II$  на I стадії теж відносно невеликий, хоча загальні закономірності зміни  $\Delta\varepsilon^II$  зі збільшенням  $N$  залишаються такими ж, як при  $\sigma_a = 380$  МПа.

Відносна тривалість I, II та III стадій при  $\sigma_a = 310$  МПа відповідно становить 10,04; 63,83 і 26,13% від загальної довговічності  $N = 25732$  цикли, що вказує на подальше зростання відносно тривалості III стадії при зменшенні  $\sigma_a$  від 380 до 310 МПа. Причину цього певною мірою пояснюють фрактографічні дослідження [3].

При  $\sigma_a \leq \sigma_{-1}$ , тобто в області необмеженої втомної довговічності, типовою є деформаційна поведінка сталі з повільним зростанням протягом II стадії  $\Delta\varepsilon^II$  зі швидкістю, що характеризується кутим  $\beta$  (рис. 3, б), який при зниженні  $\sigma_a$  зменшується.

Відносна тривалість циклічного знеміцнення на першій стадії багатocyклової корозійної втоми невелика (табл. 1), проте тривалість цього процесу, виражена в циклах, є величиною

одного порядку із величиною  $N$  при малоцикловій корозійній втомі (рис. 1).

Те ж саме стосується вираження тривалості III стадії, величина якої відповідає залишковій довговічності і легко знаходиться з кінетичних кривих, досягаючи при  $\sigma_a = 140$  МПа величини  $10^5$  циклів (рис. 3, б).

Якщо злами при  $\sigma_a > \sigma_{0,2}^*$  відрізняються наявністю у корозійно-втомній зоні поглиблених ділянок та уступів, що свідчить про паралельне поширення тріщин у віддалених площинах та їх подальше злиття, то при  $\sigma_a = \sigma_{-1}$  типвою є поверхня корозійно-втомного руйнування спіральної форми з перпендикулярним до неї радіальним уступом.

При  $\sigma_a \approx 0,5\sigma_{0,2}^*$  корозійно-втомна зона охоплює доволі значну поверхню зламу (рис. 3, б), про що свідчить відношення площі корозійно-втомної зони до площі зони долому  $S_{KO}/S_D = 3,89$  (рис. 4). Поверхня корозійно-втомного руйнування виглядає плоскою, що вказує на формування магістральної тріщини шляхом злиття

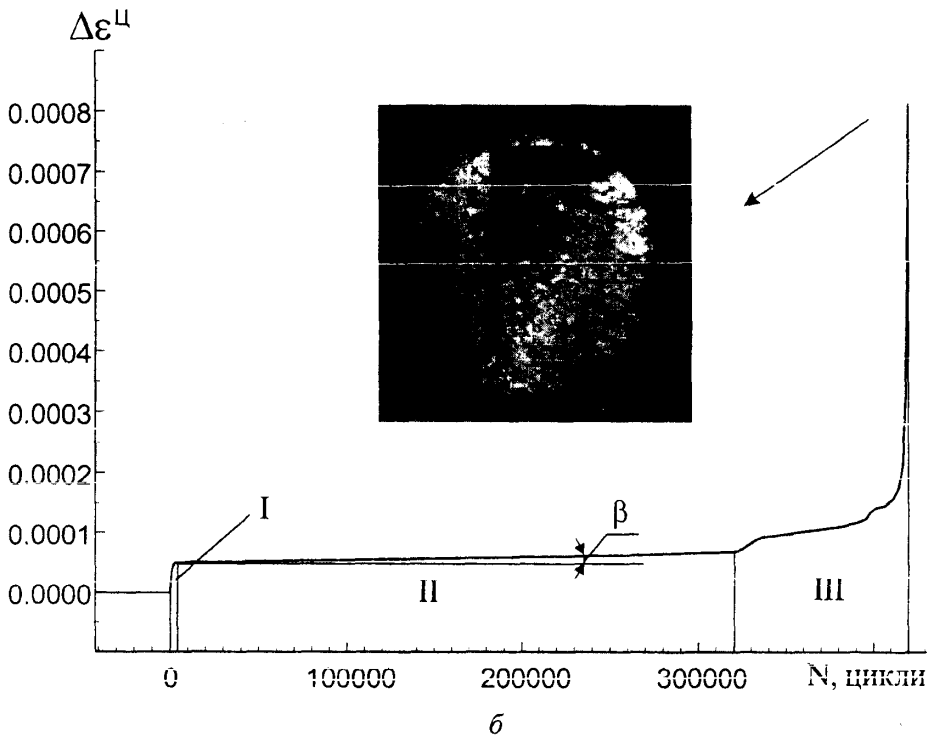
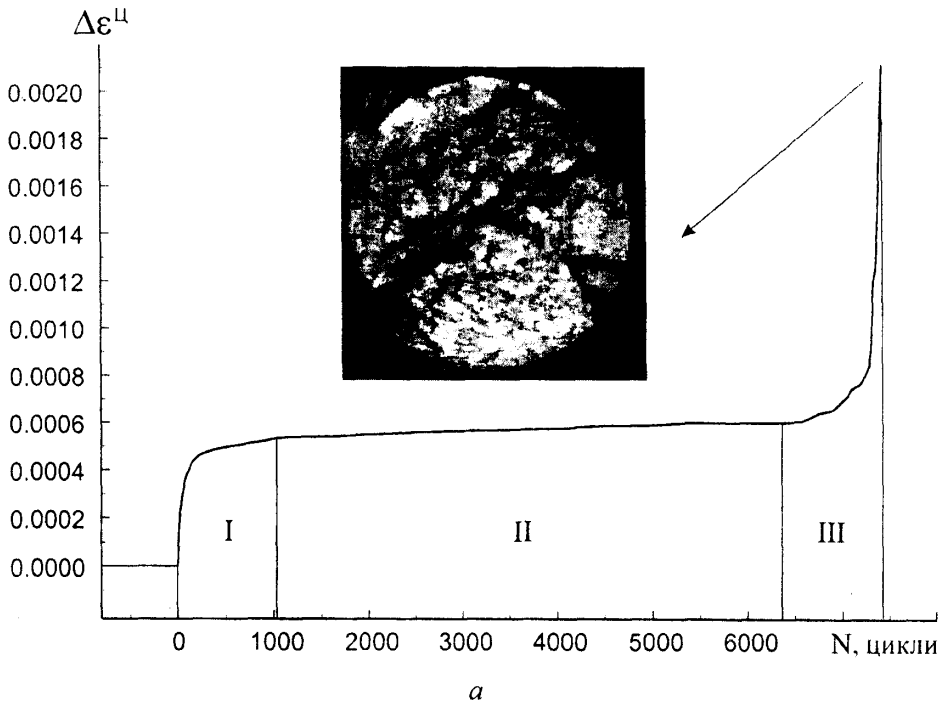


Рисунок 3 — Кінетика пластичної деформації текстурованої сталі трубопроводу у морській воді при 380 (а) та 140 МПа (б)

Таблиця 1 — Тривалість деформаційних стадій низькочастотної багатоциклової корозійної втоми при  $\sigma_a$   $\sigma_{-1}$

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

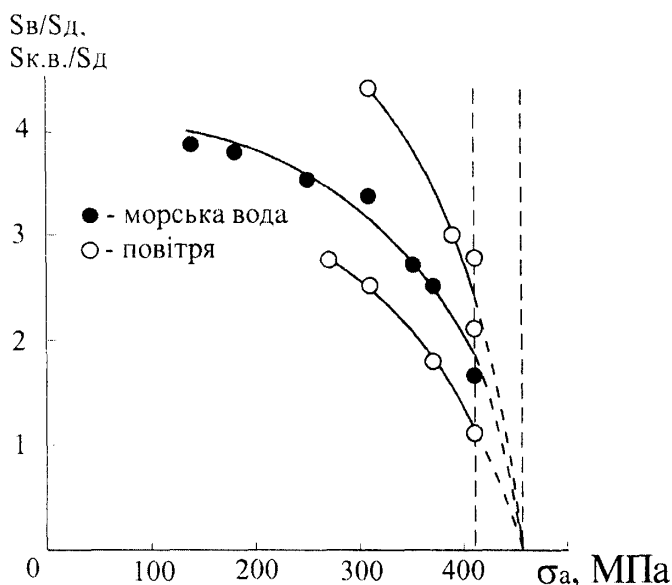
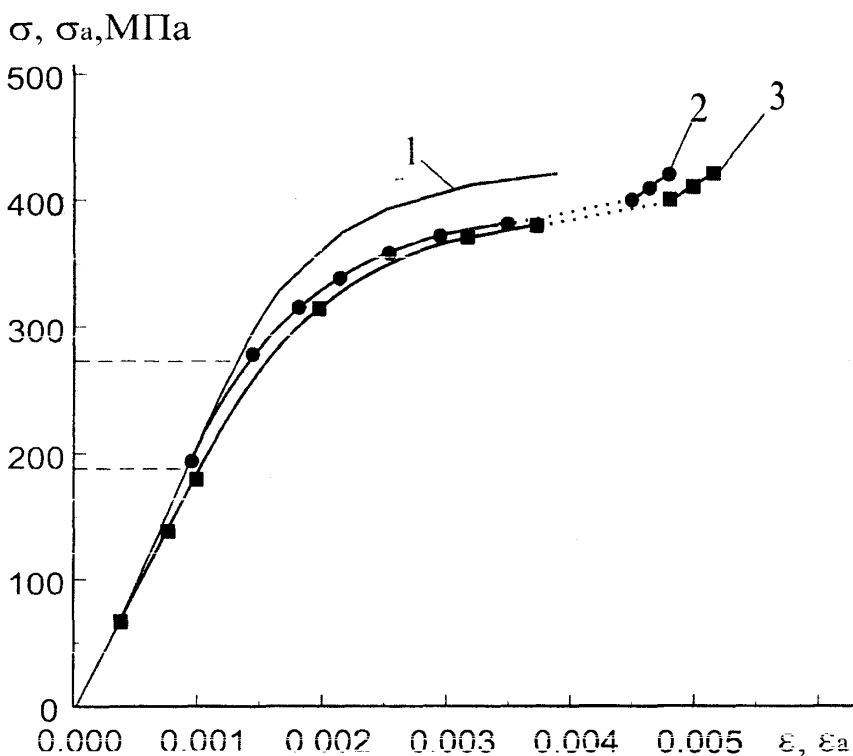
Рисунок 4 — Залежність відношення  $S_{к.в./S_d}$  та  $S_{в./S_d}$  від амплітуди напружень

Рисунок 5 — Діаграми згину зразків-моделей з текстурованої сталі 20 при статичному (1), та низькочастотному (2, 3) навантаженні у повітрі (2) та морській воді (3)

одиночних тріщин, розташованих в близьких паралельних площинах. Перехід від корозійно-втомної зони до долому досить чіткий, що при  $\sigma_a > \sigma_{0,2}^*$  не спостерігається.

Як показали дослідження (рис. 4), відношення  $S_{к.в./S_d}$  та  $S_{в./S_d}$  в першу чергу є мірою величини руйнівних циклічних напружень, які спричиняють долом зразка. При  $\sigma_a = \text{const}$  ці відношення можуть змінюватися в доволі широкому діапазоні, що особливо простежується при випробуваннях у повітрі. Якщо такий розкид результатів пов'язати з відчутною анізо-

тропією фізико-механічних властивостей текстурованої сталі, то можна прийти до висновку, що її вплив у корозійному середовищі значно менший.

У повітрі відношення площі втомної зони до площі зони долому  $S_{в./S_d}$  може теоретично змінюватися від нуля, коли  $S_{к.в.} = 0$  і фіксується злам у статиці, до максимальних значень у випадку руйнування при  $\sigma_a$ , близьких до  $\sigma_{-1}$ . В корозійному середовищі існує лише умовна границя корозійної витривалості при вибраній базі випробувань, тому при  $\sigma_a \rightarrow 0$ ,  $S_{к.в./S_d} \rightarrow \infty$ ,

що експериментально перевірити дуже важко, оскільки крива корозійної втоми в координатах  $\sigma_a - N$  асимптотично наближується до осі абсцис, і нескінченно зростає база випробовувань.

Комп'ютерна екстраполяція кривих  $S_g/S_d$ ,  $S_{к.г.}/S_d - \sigma_a$  на вісь абсцис (рис. 4) вказує на можливість існування спільного значення  $\sigma_a$ , близького до величини границі міцності при повторному статичному згині  $\sigma_{мі}^{\delta}$ , при якому  $S_g/S_d = S_{к.г.}/S_d = 0$ .

Непружність у морській воді спостерігається і при  $\sigma_a$ , менших від циклічної границі текучості  $\sigma_{0,2}^{*ц}$ , що зумовлено адсорбційно-електрохімічною дією середовища та низькочастотним фактором; відповідно крива 3 розташована правіше кривої 2 (рис. 5).

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

### Література

1. Kuriakides S., Netto T. A. On the dynamics of propagating buckles in pipelines // Int. J. Solids and Struct. – 2000. – 37, № 46-47. – P.6843-6867.

2. 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.

3. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Методологічні аспекти дослідження взаємозв'язку процесів деформації та руйнування трубопроводів // Нафт. і газова пром-сть. – 2002. – № 5. – С. 33-38

4. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Особливості деформування текстурованої сталі трубопроводу при навантаженні чистим згином // Науковий вісник національного технічного університету нафти і газу. – 2001. – № 1. – С. 57-61.

5. Крижанівський Є.І., Побережний Л.Я. Деформаційна поведінка сталі трубопроводу при низькочастотній втомі // Трибофатика: Пр. 4-го Міжнародного симпозиуму з трибофатики, 23-27 вересня 2002 р., Тернопіль (Україна) / Відп. ред. В. Т. Трошенко. – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. І.Пулюя, 2002. – Т. 1. – С. 296-300.

6. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. – К.: Наук. думка, 1976. – 128 с.

УДК 539.3

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В ОКОЛІ КІЛЬЦЕВОГО ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ ТРУБ З УРАХУВАННЯМ СТРУКТУРНИХ ЗМІН В ЗОНІ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ

<sup>1</sup>Ю.В.Банахевич, <sup>2</sup>В.А.Осадчук, <sup>2</sup>А.Р.Дзюбик

<sup>1</sup> Філія УМГ "Львівтрансгаз", 79047, м. Львів, вул. Рубчака, 3, тел. (0322) 634105

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська Політехніка", 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 13, тел. (0322) 398518, 398798

Предложен подход к определению остаточных напряжений расчетно-экспериментальным методом с учетом влияния структурно-фазового состава материала сварного соединения на магнитную проницаемость, на которой базируются измерения с помощью приборов магнито-упругой тензометрии. Получен новый функционал для определения поля условных пластичных деформаций. Представлены результаты моделирования распределения остаточных напряжений в сварном соединении труб кольцевым швом с использованием экспериментально полученных данных.

В роботі запропоновано підхід до визначення залишкових напружень у кільцевому зварному з'єднанні з урахуванням впливу структурно-фазового складу шва на магнітопружні

The approach to definition of residual pressure by a settlement – experimental method is offered in view of influence of structural-phase structure of welded connection on magnetic permeability on which measurements with the help of magnetic devices are based. It is received new function for definition of a field of conditional plastic deformations. Results of modelling of distribution of residual pressure in welded connection of pipes by a ring seam with use of experimentally received data are submitted.

властивості матеріалу. При цьому використовується розрахунково-експериментальний метод умовних пластичних деформацій [1]. Цей метод ґрунтується на використанні розв'язків рів-