

УДК 539.372, 539.38

ЦИКЛІЧНА ПОВЗУЧІСТЬ ТРУБ ЗА БЛОЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВНУТРІШНІМ ТИСКОМ

М. П. АДАМЧУК, М. В. БОРОДІЙ, В. О. СТРИЖАЛО,
З. С. ЯСКОВЕЦЬ, С. А. СКАКУН

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ

Експериментально досліджено особливості деформування прямолінійного сегмента трубопроводу Ду 200 зі сталі 20 за циклічного навантаження внутрішнім тиском. Випробування виконано на пневмогідравлічному стенді за наближених до плоско-напруженого стану умов, з реєстрацією колових та осьових пружно-пластичних деформацій. Програмою досліджень передбачено блочне циклічне навантаження труби зі змінною амплітудою, але з постійним у циклі середнім напруженням. Отримано діаграми деформування, спричиненого циклічною повзучістю (ратчетингом) труби в коловому і осьовому напрямках після 100 cycles у кожному з трьох блоків навантаження. Встановлено, що зі збільшенням амплітуди навантаження (порівняно зі застосованим у попередньому блоці) посилюється ефект циклічної повзучості, а внаслідок повернення до нижчого рівня навантаження цей ефект нівелюється.

Ключові слова: *циклічна повзучість (ратчетинг), деформування труб внутрішнім тиском, колові і осьові деформації, блочна схема циклічних навантажень.*

Specific features of deformation of a straight segment of a Ду 200 pipeline made of steel 20 under internal pressure cyclic loading have been experimentally investigated. The test was carried out on a pneumohydraulic stand under conditions close to the plane-stress state with registration of circumferential and axial elastic-plastic deformations. The investigation program provides a block cyclic load of a pipe with a varying amplitude, but with a constant average stress in the cycle. Strain diagrams are obtained due to cyclic creep (ratcheting) of the pipe in the circumferential and axial directions after 100 cycles in each of the three load blocks. It is shown that an increase in the load amplitude (compared to that applied in the previous block) enhances the effect of cyclic creep, and a return to the lower load level neutralizes this effect.

Keywords: *cyclic creep (ratcheting), deformation of pipes by internal pressure, circumferential and axial deformations, block diagram of cyclic loads.*

Вступ. Магістральні і промислові трубопроводи – відповідальна частина технологічного обладнання нафтогазової, хімічної та енергетичної індустрій. Магістральні працюють за високих тисків і зазнають тривалого впливу складних експлуатаційних зовнішніх (зсуви ґрунту, перетини з автодорогами, зони баластування на підземних ділянках, чи навантаження від перепадів температури, поривів вітру, ваги снігу на надземних переходах) і внутрішніх (робочий тиск, підвищена температура, корозивне середовище тощо) чинників [1]. Режимми транспортування продукту не завжди стаціонарні і мають сезонний характер, а також можуть змінюватися під час виконання ремонтних робіт або обстежень, що зумовлює певну циклічність навантаження труб тиском. Енергетичні та промислові трубопроводи менше піддані зовнішнім впливам, проте за вищих температур, специфічних умов обпирання та закріплення, складного просторового розташування в них допускають осьові переміщення (для уникнення заклинювань).

Переважна більшість трубопроводів експлуатуються понад проектний термін. Внаслідок старіння і деградації в металі утворюються дефекти різного походження, в тому числі через загальну корозію, що призводить до зменшення номінальної товщини стінки труб і не гарантує безпечної експлуатації трубопроводу за проектного внутрішнього тиску. Одна з основних вимог до товщини стінки труб – недопущення пластичних деформацій металу від робочих навантажень [2]. Проте через таке стоншення (внаслідок загальної корозії або ерозійно-корозійного зношування) на окремих ділянках трубопроводу можуть виникати пружно-пластичні деформації.

Виникнення у трубах або посудинах під тиском високонапружених зон, в яких можливе пружно-пластичне деформування матеріалу, періодичний характер їх циклічного (асиметричного) навантаження внутрішнім тиском та необмеженість радіальних і осьових переміщень – основні причини циклічної повзучості (ЦП), яку в англійській літературі називають ратчентингом (ratcheting). Внаслідок ЦП накопичуються контрольовані напруженнями пластичні деформації від асиметричних циклічних навантажень [3, 4], які локалізуються в найслабшому перерізі труби, а наводнювання інтенсифікує цей процес [5]. Через вичерпування пластичності матеріалу може утворитися наскрізний дефект.

Явище ЦП металів відоме давно [3], ґрунтовно досліджене експериментально, особливо за одновісного навантаження [6–9], та промодельоване у межах теорії циклічної пластичності [6, 7]. Його вважають типовим для більшості металів. Особливістю є те, що ЦП відбувається лише за циклічних навантажень і за відсутності структурних дефектів, тобто за однорідного розподілу напружень [10]. Під час випроб на ЦП зразки навантажують однорідним (одновісним) розтягом з ненульовим середнім напруженням циклу, яке зумовлює асиметрію. Деформація, спричинена ЦП, накопичується від циклу до циклу. Середнє напруження циклу та розмах напружень є визначальними для її прояву. За постійного розмаху напружень деформація ЦП зростає з підвищенням середнього значення в циклі, а також зі збільшенням розмаху за постійного середнього значення напружень [7, 8]. За всіх комбінацій навантажень швидкість деформації ЦП зменшується зі збільшенням кількості циклів навантаження, що властиве всім типам матеріалів. Зокрема, якщо криві ЦП подавати в подвійних логарифмічних координатах, то швидкість знижується за експоненційним законом [9] і її можна описати лінійною функцією.

Ознаки ЦП змінюються з ускладненням схеми навантаження. Зокрема, суттєве попереднє монотонне деформування матеріалу на 4,5% значно впливає на ЦП після такого перенавантаження [9]. При цьому деформування відбувається в напрямі, протилежному дії середнього напруження. Довжина зразка фактично зменшується, попри позитивне середнє напруження циклу. Під однаковими напруженнями за різного напруженого стану в елементі криві ЦП відрізняються [11]. Результати випроб за одновісної ЦП суцільних зразків за блочного навантаження з варіацією середнього напруження циклу і розмаху напружень свідчать, що зі збільшенням як середнього, так і амплітудного напружень циклу суттєво посилюється накопичення деформацій ЦП, проте з поверненням на попередній (менший рівень навантажень) ЦП майже припиняється [12].

Останнім часом, вивчаючи ЦП, використовують багатівісні навантаження [13–16]. Інтенсивно досліджують вплив непропорційності (складності) циклу навантаження на ефект ЦП [15–17]. Отримані результати про дію двовісних навантажень на ЦП дали змогу конкретизувати параметри розрахункових моделей для прогнозування ефекту ЦП [13, 18]. Найчастіше під час багатівісних випроб трубчасті зразки навантажують знакозмінною осьовою силою та крутним моментом [14–16] або знакозмінною осьовою силою та циклічним внутрішнім тиском [19].

За найпростішої схеми їх навантажують постійним внутрішнім тиском (колові напруження), одночасно змінюючи осьові напруження (деформації). Складнішу схему забезпечують циклічною зміною тиску. Такі двовісні навантаження сприяють виникненню деформації ЦП у коловому напрямі.

Отже, ефект ЦП досліджують у лабораторних умовах, застосовуючи суцільні плоскі та циліндричні зразки за одновісного навантаження та трубчасті – за багатовісного. Лише в поодиноких публікаціях аналізували ЦП реальних конструкційних елементів (гини труб) [19, 20], зокрема, із кутом загинання 90° за навантаження постійним внутрішнім тиском (0; 11,3; 20,7 МПа) з одночасним циклічним переміщенням торців гину з амплітудою 11,8 мм, що спричинило додатковий змінний момент [19]. Вивчали локальну ЦП у зоні дії максимального моменту згину, внаслідок якого в зоні перегину труб зростала овальність їх радіальних перерізів. Найбільшу деформацію ЦП у коловому напрямі зафіксували саме тут. Підтверджено, що максимальні деформації ЦП локалізуються в серединній частині гинів і орієнтовані в коловому напрямі [20]. В зоні максимальної ЦП за тривалою циклічного навантаження утворюється наскрізна тріщина.

Експериментальних досліджень ЦП конструкційних елементів недостатньо, тому розроблення методики вивчення ефекту ЦП на циліндричних трубних елементах за їх циклічного навантаження внутрішнім тиском актуальне і є головною метою цієї публікації.

Матеріали, обладнання та програма випроб. Ефект ЦП вивчали, використовуючи трубний елемент діаметром 198, номінальною товщиною стінки 9 та довжиною 600 мм зі сталі 20, з якої виготовляють котли високого тиску, колектори, трубопроводи, фланці, патрубки та елементи корпусів і обшивки. Хімічний її склад такий (mass%) [21]: 0,17...0,24 C; 0,17...0,37 Si; 0,35...0,65 Mn; 0,25 Ni; 0,04 S; 0,04 P; 0,25 Cr; 0,25 Cu; 0,08 As.

Для випробувань внутрішнім тиском до торців трубного елемента приварювали фланці. Безпечна експлуатація стенда розрахована на внутрішній тиск до 15 МПа, тому робочі частини трубних елементів проточували ззовні до товщини стінки 3,2...3,4 мм.

Механічні характеристики сталі визначали на п'ятикратних зразках діаметром 3 мм поздовжньої і поперечної орієнтації, які випробовували на машині РМ-0,5 згідно з вимогами [22]. Усереднені механічні характеристики сталі такі: границі міцності і плинності 412 і 283 МПа, а відносні видовження і звуження 34 і 59%, відповідно. Характеристики не залежали від орієнтації зразків і різниці між ними не перевищувала 2%. Тому матеріал труби вважали майже ізотропним.

Трубний елемент циклічно навантажували на пневмогідролінійній установці, призначеній для дослідження труб та посудин під тиском (рис. 1) [23].

Трубну секцію циклічно навантажували внутрішнім тиском, що змінювався за трикутним або трапецеподібним циклами. Цикл навантаження тиском мав періодичну трапецеподібну форму (рис. 2). Навантажували труби тиском до пікових максимальних p_{\max} і мінімальних p_{\min} значень у півциклах навантаження із витримкою 1 с.

Під час випроб труби на ЦП фіксували зміну у часі колових і осьових деформацій. Для цього застосували фольгові константанові тензорезистори з базою 5 мм та перетворювачі сигналу. У кожній з трьох точок вимірювання встановлювали два тензорезистори для визначення поперечних і осьових деформацій, а також на зовнішній поверхні центральної частини труби в трьох рівновіддалених точках її одного діаметрального перерізу, зміщених по колу на 120° . Тензорезистори на трубі та окремих металевих пластинах з аналогічного матеріалу (для термокомпенсації) під'єднували до мостової електричної схеми вимірювання опору (міст Уїтстона), зміну напруги на плечах якої підсилювали нормалізаторами сиг-

налу тензодавачів SG-3016, а за допомогою АЦП типу Е14 і програмного забезпечення “Power Graph” їх фіксували в пам’яті ПК. Рівень деформації розраховували як середнє значення замірів у трьох точках.

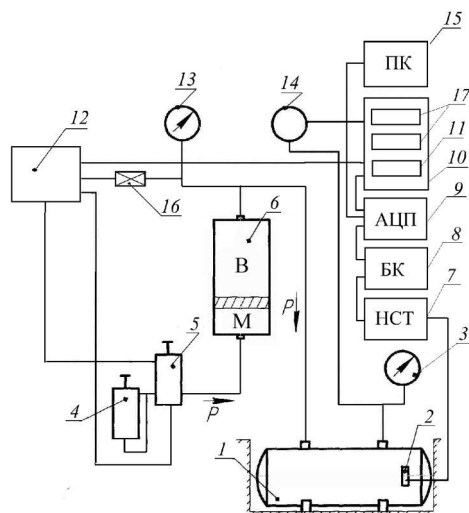


Рис. 1. Блок-схема випробувальної установки: 1 – об’єкт випробування; 2 – тензометр; 3 – манометр на виході об’єкта випроб; 4 – регулятор швидкості навантаження; 5 – редуктор тиску p ; 6 – роздільна камера; 7 – нормалізатор сигналів тензометрів (НСТ); 8 – блок комутації (БК); 9 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 10 – пульт управління; 11 – блок живлення (БЖ); 12 – агрегат циклічної зміни тиску; 13 – манометр на вході зразка; 14 – перетворювач тиску типу MBS 3035 або SEN 3376; 15 – персональний комп’ютер (ПК); 16 – вентиль скидання тиску; 17 – регулятор тиску типу РД-5 (2 шт.); робоче середовище насоса та системи навантаження – відповідно, мінеральне мастило (М) і вода (В), \bar{p} – напрямок нагнітання внутрішнього тиску.

Fig. 1. Block-scheme of the test machine: 1 – test object; 2 – strain gauge; 3 – pressure gauge at the outlet of the test object; 4 – load rate regulator; 5 – pressure reducer p ; 6 – separate chamber; 7 – normalizer of strain gauge signals (NST); 8 – switching unit (BC); 9 – analog-to-digital converter (ADC); 10 – control panel; 11 – power supply (PS); 12 – unit of cyclic pressure change; 13 – pressure gauge at the inlet of the sample; 14 – pressure transducer type MBS 3035 or SEN 3376; 15 – personal computer (PC); 16 – pressure relief valve; 17 – pressure regulator type RD-5 (2 pcs.); the working environment of the pump and the load system – mineral oil (M) and water (B) respectively, \bar{p} – the direction of injection of internal pressure.

Згідно з вимогами щодо якості виготовлення трубного елемента [24] для перевірки герметичності (див. рис. 1) та безпечної експлуатації систему гідровипробовували внутрішнім тиском 5 МПа, що спричиняло колові напруження у трубі 140 МПа (0,5 від границі плинності σ_T матеріалу). За цього тиску трубний елемент витримували 2 min, щоб візуально виявити на його поверхні дефекти.

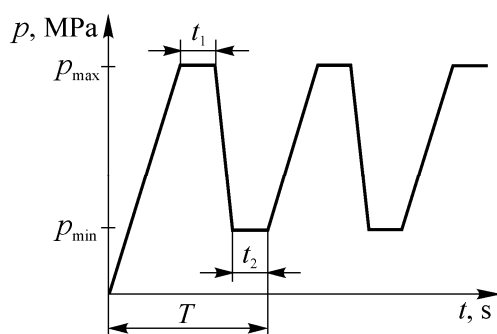


Рис. 2. Схема циклічного навантаження трубної секції внутрішнім тиском.

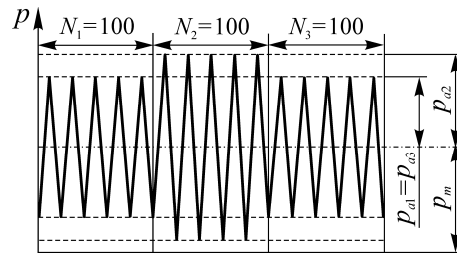
Fig. 2. Scheme of cyclic loading of a pipe section with internal pressure.

Програма експерименту передбачала блочне циклічне навантаження трубного елемента [25] з послідовними трьома блоками по 100 cycles кожен зі ступінчастою зміною тиску у трубі p_a за незмінності його середнього значення у циклі p_m (рис. 3). Використане у першому блоці навантаження спричинило незначні (0,03%) пластичні деформації в коловому напрямі, у другому – його вищу амплі-

туду, а у третьому таке ж навантаження, як і в першому. При цьому середнє значення тиску (напружень) залишалось незмінним.

Рис. 3. Схема зміни тиску води у трубі p під час випробувань трубного елемента блочним циклічним навантаженням.

Fig. 3. Diagram of the change in the water pressure in the pipe p during testing of the pipe element with the block cyclic load.



Внутрішній тиск p у трубі, за якого колові напруження досягнуть границі плинності матеріалу, визначили з умови: $\sigma_T = p \cdot R / t$, де R , t – внутрішній радіус та товщина стінки трубного елемента, m . Пластична деформація в коловому напрямі трубного елемента можлива за внутрішнього тиску понад 10,3 МПа (з урахуванням двовісності навантаження розтягом). Крім того, деформацію труби контролювали тензометричною системою в реальному часі.

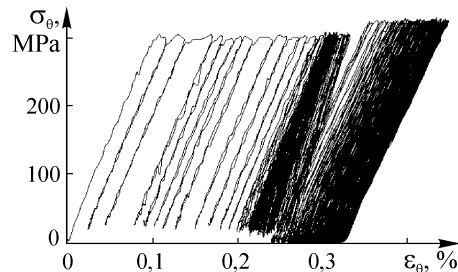
Результати та їх обговорення. Трубу випробовували в лабораторних умовах. Внутрішній тиск, за якого зафіксували пластичну деформацію у коловому напрямі, становив $p_{\min} = 10,5$ МПа. Максимальні та мінімальні його значення під час відповідних блоків навантаження такі: $p_1^{\max} = p_3^{\max} = 10,8$ МПа; $p_1^{\min} = p_3^{\min} = 1$ МПа; $p_2^{\max} = 11,6$ МПа; $p_2^{\min} = 0,2$ МПа. Максимальне його значення під час першого блоку навантаження (p_1^{\max}) прийняли за досягнення залишкових (пластичних) деформацій у коловому напрямку 0,033%, що відповідало коловим напруженням $\sigma_\theta = 300$ МПа, які дещо перевищують границю плинності матеріалу труби ($\sigma_T = 283$ МПа).

Розмах напружень у циклі в межах кожного з блоків знаходили як різницю його максимальних та мінімальних значень, а середні – як середнє арифметичне цих значень. Параметри циклу відповідних блоків навантаження (для колових напружень) такі: для першого і третього блоків амплітудне напруження циклу $\sigma_a = 136$, а середнє – $\sigma_m = 164$ МПа, коефіцієнт асиметрії циклу $R = 0,093$; для другого блоку – $\sigma_a = 158$ МПа, $\sigma_m = 164$ МПа, а $R = 0,017$.

Для стабілізації пікових значень напружень у кожному півциклі навантаження трубу витримували під тиском 1 s. За циклічного навантаження трубного елемента внутрішнім тиском реалізовували двовісне навантаження зі співвідношенням пружних колових і осьових напружень $\sigma_\theta / \sigma_x = 2$. Тому передбачали, що ефект ЦП проявиться чіткіше в коловому напрямі деформування елемента.

Рис. 4. Діаграма деформування трубного елемента в координатах колові деформації ε_θ –колові напруження σ_θ .

Fig. 4. Strain diagram of a pipe element in the coordinates of circular deformations ε_θ –circumferential stresses σ_θ .



За результатами випробувань отримали діаграми деформування (діаграми ЦП) трубного елемента в коловому та осьовому напрямках. Виявили, що впродовж перших циклів (до 15 cycles) першого блоку навантаження приріст деформації від ЦП був найбільшим, далі поступово зменшувався і стабілізувався (рис. 4).

Таку тенденцію зафіксували і під час випробувань зразків на ЦП. Проте в трубному елементі проти лабораторних зразків деформація зменшувалася нерівномірно [11]. З переходом до другого блоку характер деформування подібний до властивого ЦП на перших циклах інтенсивної деформації з тенденцією до її зменшення і стабілізації. Як і під час попереднього блоку, швидкість накопичення деформацій падає і стабілізується на певному рівні, який проте більший, ніж після першого блоку через вищі навантаження. З переходом до третього блоку, який повторює перший блок, ЦП зупиняється і накопичення деформацій тут не виявили.

За діаграмою деформування трубного елемента в координатах осеві деформації ϵ_x –осеві напруження σ_x виявили (рис. 5), що ϵ_x на порядок менші за колові ϵ_θ (див. рис. 4). І якщо в коловому напрямку ефект ЦП очевидний, то в осьовому його практично виявити важко. Внаслідок двовісності навантаження відбувається постійний перерозподіл осевих деформацій через значний вплив пластичного деформування в коловому напрямку. При цьому, не зважаючи на прикладені зовнішні напруження розтягу від внутрішнього тиску, ϵ_x зі збільшенням кількості циклів поступово стають від'ємними, тобто переріз труби в осьовому напрямку зазнає стиску. Лише на початкових циклах першого і другого блоків навантаження осеві деформації відповідають позитивним осьовим напруженням від внутрішнього тиску, але зі збільшенням кількості циклів постійно зменшуються і стають від'ємними внаслідок суттєвого впливу колових пластичних деформацій.

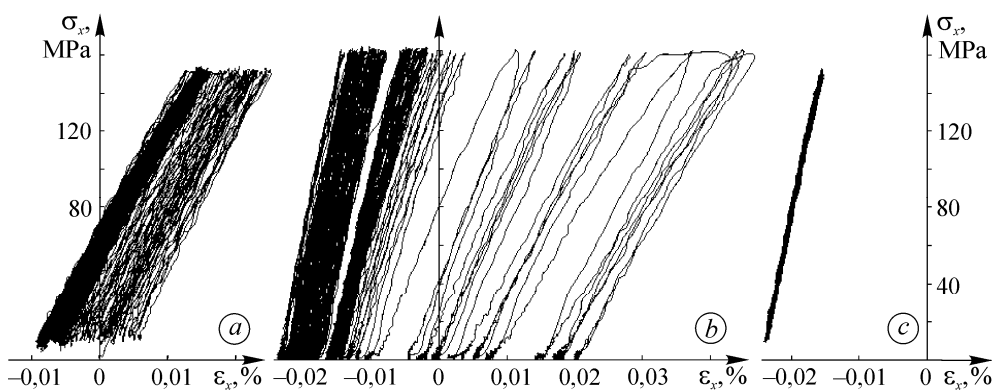


Рис. 5. Діаграми деформування трубного елемента в координатах осеві деформації ϵ_x –осеві напруження σ_x : *a* – перший блок; *b* – другий; *c* – третій.

Fig. 5. Strain diagrams of a pipe element in the coordinates axial deformations ϵ_x –axial stresses σ_x : *a* – the first block; *b* – the second; *c* – the third.

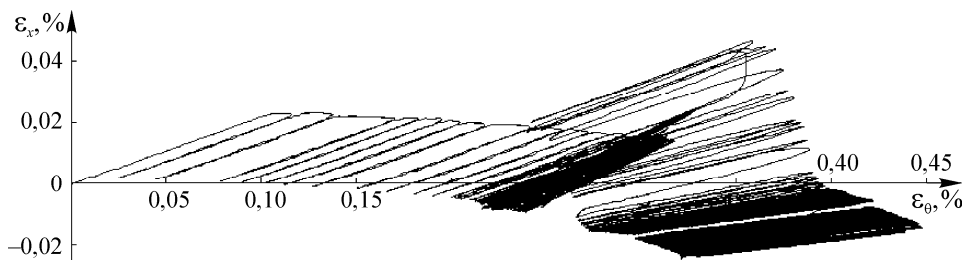


Рис. 6. Діаграма деформування труби в координатах осеві ϵ_x –колові ϵ_θ деформації.

Fig. 6. Pipe strain diagram in coordinates axial ϵ_x –circumferential ϵ_θ deformations.

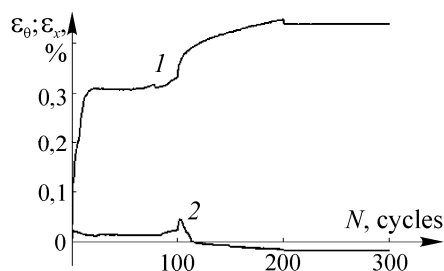
Загальний розподіл колових ϵ_θ і осевих ϵ_x деформацій за циклічного блочного навантаження трубного елемента внутрішнім тиском ілюструє рис. 6, а графіки зміни їх максимальних значень у циклі навантаження залежно від їх кількості N подано на рис. 7.

Зі збільшенням деформацій ЦП у коловому напрямі осьові зменшуються (рис. 6), причому за більшого їх приросту під час другого блоку – інтенсивніше.

Виявили (рис. 7), що під час першого блоку навантаження ріст деформацій ЦП у коловому напрямі припинився після 25 cycles з повторним відновленням після 70 cycles. З переходом до другого блоку на сотому циклі накопичена деформація в центральній частині труби досягла 0,33%. У межах другого блоку деформація ЦП за перші цикли суттєво зростала і відхилялася від рівня, усталеного після першого блоку, з постійним її приростом через ЦП. Перехід до третього блоку з меншим рівнем навантажень відбувся після другого через досягнення коловими деформаціями значення 0,45%. Далі колові деформації у межах третього блоку не накопичувались. Таким чином, можна зробити висновок, що збільшення амплітуди навантаження сприяє прояву ефекту ЦП, а її зменшення (порівняно зі застосованим упродовж попереднього блоку навантаження) нівелює його ознаки.

Рис. 7. Накопичення деформацій у коловому ϵ_θ (крива 1) та осьовому ϵ_x (крива 2) напрямках залежно від кількості циклів N навантаження труби внутрішнім тиском.

Fig. 7. Accumulation of deformations in the circular ϵ_θ (curve 1) and axial ϵ_x (curve 2) directions depending on the number of cycles N of the pipe loading by internal pressure.



Графік (рис. 7) побудовано за результатами розрахунку пікових деформацій у півциклі навантаження. Зі збільшенням амплітуди навантаження та ростом деформацій ЦП у коловому напрямі (через перерозподіл деформацій під час пружно-пластичного навантаження трубного елемента) його осьові деформації дрейфують від розтягу до стиску.

ВИСНОВКИ

Розроблено методику експериментальних досліджень посудин з асиметричним навантаженням внутрішнім тиском, яку апробовано на трубному елементі зі сталі 20. Вивчено ефект ЦП за його блочного навантаження зі ступінчастою зміною амплітуди. Встановлено якісну подібність ефекту ЦП трубного елемента і лабораторних зразків, але з нерівномірнішим деформуванням труби, що можна пояснити суттєвішою неоднорідністю її матеріалу, різнововщинністю в точках замірів або інерційністю системи навантаження тиском. Зміна амплітуди навантаження значно впливає на ефект ЦП: з її збільшенням швидкість росту пластичних деформацій на усталеній стадії ЦП зростає, а зі зменшенням (проти використаної на попередньому етапі блочного навантаження) накопичення деформацій припиняється. Двовісне тривале циклічне навантаження сприяє перерозподілу осьових напружень. Зі збільшенням амплітуди навантаження та деформацій ЦП в коловому напрямі осьові деформації трубного елемента змінюються від розтягу до стиску під час пружно-пластичного навантаження.

1. *Методологія* і експертна система для поточного моніторингу реального стану і забезпечення цілісності трубопроводів з метою подовження їх ресурсу / А. Я. Красовський, І. В. Ориняк, В. М. Тороп, С. А. Радченко, М. В. Бородій, А. С. Батура, А. В. Богдан // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин / Під заг. ред. Б. Є. Патона. – К.: ІЕЗ НАН України, 2006. – С. 309–314.
2. *СНиП 2.05.06-85*. Магистральные трубопроводы. Строительные нормы и правила. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 52 с.

3. *Bairstow L.* The elastic limits of iron and steel under cyclic variations of stresses // *Phil. Trans. Roy. Soc. London A.* – 1911. – **210**. – P. 35–55.
4. *Strizhalo V. A. and Kalashnik M. V.* Cyclic creep of structural alloys and its relationship to the acoustic-emission parameters // *Strength of Mat.* – 1984. – **16**, № 9. – P. 1280–1285.
5. *Influence of hydrogen on the initiation of creep-fatigue cracks in plates near stress concentrators* / O. E. Andreikiv, I. Ya. Dolins'ka, L. N. Dobrovols'ka, and N. V. Yavors'ka // *Materials Science.* – 2015. – **50**, № 4. – P. 507–515. DOI:10.1007/s11003-015-9748-5
6. *Borodii M. V.* Modeling of the asymmetric low-cycle loading in the space of stresses // *Strength of Mat.* – 1998. – **30**, № 5. – P. 472–480.
7. *Hassan T. and Kyriakides S.* Ratcheting in cyclic plasticity, Part I: Uniaxial Behavior // *Int. J. Plasticity.* – 1992. – **8**, № 1. – P. 91–116.
8. *Haupt A. and Schinke B.* Experimental on the ratcheting behavior of AISI 316L(N) austenitic steel at room temperature // *J. of Eng. and Mat. and Techn.* – 1996. – **118**, № 3. – P. 281–284.
9. *Paul S. K.* A critical review of experimental aspects in ratcheting fatigue: microstructure to specimen to component // *J. of Mat. Res. and Techn.* – 2019. – **8**, № 5. – P. 4894–4914.
10. *Dahlberg M. and Segle P.* Evaluation of models for cyclic plastic deformation. A literature study // *Swedish Radiation Safety Authority.* – 2010. – Report № 2010:45. – 56 p.
11. *An experimental study of ratcheting effect under multiaxial proportional loading* / M. V. Borodii, V. O. Stryzhalo, M. K. Kucher, and M. P. Adamchuk // *Strength of Mat.* – 2014. – **46**, № 1. – P. 97–104.
12. *Constitutive modeling for the anisotropic uniaxial ratcheting behavior of Zircaloy-4 alloy at room temperature* / H. Li, M. Wen, G. Chen, W. Yu, and X. Chen // *J. Nuclear Mat.* – 2013. – **443**, № 1–3. – P. 152–160.
13. *Hassan T., Corona E., and Kyriakides S.* Ratcheting in cyclic plasticity, Part 2: Multiaxial Behavior // *Int. J. Plasticity.* – 1992. – **8**, № 2. – P. 117–146.
14. *Hassan T., Taleb L., and Krishna S.* Influences of non-proportional loading paths on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models // *Int. J. Plasticity.* – 2008. – **24**, № 10. – P. 1863–1889.
15. *Experimental study on uniaxial and nonproportionally multiaxial ratcheting of SS304 stainless steel at room and high temperatures* / G. Kang, Q. Gao, L. Cai, and Y. Sun // *Nuclear Eng. and Design.* – 2002. – **216**, № 1–3. – P. 13–26.
16. *Ratcheting of stainless steel 304 under multiaxial nonproportional loading* / K. S. Kim, R. Jiao, X. Chen, and M. Sakane // *J. Pressure Vessel Techn.* – 2009. – **131**, № 2. – P. 021405.
17. *Adamchuk M. P. and Borodii M. V.* Determination of steady ratcheting strain rate under biaxial loading based on cycle nonproportional coefficient // *Strength of Mat.* – 2017. – **49**, № 2. – P. 250–255.
18. *Hamidinejad S. M.* Development of a kinematic hardening rule to assess ratcheting response of materials under multiaxial loading spectra // *PhD Thesis of Mech. Eng.* – Ontario, Toronto: Ryerson University, 2015. – 170 p.
19. *Hassan T. and Rahman S. M.* Simulation of ratcheting responses of elbow piping components // *ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conf. (Prague, Czech Republic, July, 26–30, 2009).* – 2009. – **1**. – Paper № PVP2009-77819. – P. 103–108.
20. *Ratcheting failure of pressurised straight pipes and elbows under reversed bending* / S. Vishnuvardhan, G. Raghava, P. Gandhi, M. Saravanan, S. Goyal, P. Arora, S. K. Gupta, and V. Bhasin // *Int. J. Pres. Ves. Piping.* – 2013. – **105–106**. – P. 79–89.
21. *ГОСТ 1050-88.* Прокат сортовой, калиброванный, со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия.
22. *ГОСТ 1497-84.* Металлы. Методы испытаний на растяжение.
23. *Estimation of the load carrying capacity of the bellows compensator for gas pipelines in the areas of mining production* / V. Stryzhalo, M. Zarazovskii, A. Bohdan, Z. Yaskovets, and V. Antonchenko // *ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conf. (Virtual, Online, August, 3, 2020).* – 2020. – **3**. – Paper № PVP2020-21738, V003T03A019. – 8 p.
24. *ДНАОП 0.00-1.07-94.* Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. – К.: Держнаглядохоронпраці України, 1998.
25. *Borodii M. V.* Life calculations for materials under irregular nonproportional loading // *Strength of Mat.* – 2007. – **39**, № 5. – P. 560–565.

Одержано 14.10.2021