

УДК 539.372, 539.38

Деформування елемента трубопроводу за циклічного  
навантаження внутрішнім тискомСтрижало В.О., Бородій М.В., Адамчук М.П., Ясковець З.С., Скакун С.А., Потапов І.  
Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, Київ, Україна

**Анотація.** Виконано експериментальне дослідження деформування прямолінійного сегменту трубопроводу Ду 200 із сталі 20 за циклічного навантаження внутрішнім тиском. Випробування проведені на пневмогідравлічному стенді за умов плоского напруженого стану, нормальних температур, асиметрії циклу навантаження з реєстрацією колових та осьових пружно-пластичних деформацій. Метою роботи було відпрацювання експериментальної методики для дослідження ефекту ратчетингу (одностороннього накопичення пластичних деформацій) на реальних конструктивних елементах при зміні режимів циклічного навантаження. За результатами дослідження отримані діаграми циклічного деформування (ратчетингу) труби в кільцевому і осьовому напрямках на базі 100 циклів.

**Ключові слова:** елемент трубопроводу; циклічне пружно-пластичне деформування; ратчетинг; експериментальне дослідження.

Наявність в трубах або посудинах тиску зон з високим рівнем напружень, що відповідають пружно-пластичному деформуванню матеріалу, періодичний циклічний характер пульсуючого (асиметричного) навантаження внутрішнім тиском та відсутність обмежень радіальних і осьових переміщень є основними причинами виникнення явища ратчетингу. Ефект ратчетингу (одностороннього накопичення пластичних деформацій за циклічного навантаження) експериментально досліджується в лабораторних умовах, переважно на зразках [1, 2] та моделюється з застосуванням визначальних рівнянь теорій циклічної пластичності [3, 4]. Можна відмітити лише поодинокі публікації, в яких досліджувався ратчетинг на реальних конструктивних елементах, в основному це згини труб [5, 6]. Тому видається актуальною розробка та апробація експериментальної методики дослідження ефекту ратчетингу трубопроводів, які є найбільш навантаженим та поширеним обладнанням енергетичних галузей промисловості [7].

**Метою** роботи є апробація експериментальної методики дослідження ефекту ратчетингу трубних елементів за двовісного пропорційного навантаження циклічним внутрішнім тиском.

**Матеріал та обладнання.** Геометричні розміри та усереднені механічні характеристики досліджуваного трубного елемента труба Ду200, сталь 20 (рис. 1), наведені в Таблиці. Для проведення випробувань внутрішнім тиском трубний елемент комплектувався приварними фланцями. Характеристики матеріалу визначені шляхом випробувань партії зразків, виготовлених з аналогічної трубної секції для двох напрямків вирізки (повздовжнього і поперечного). Розкид даних характеристик матеріалу для двох напрямків не перевищував 2 %, що дає підстави вважати його майже ізотропним.



Рис. 1. Трубні елементи

Таблиця. Геометричні розміри та механічні характеристики труби Ду200, сталь 20

Довжина, мм	Товщина, мм	Границя міцності, МПа	Границя текучості, МПа	Відносне видовження, %	Відносне звуження, %
600	3	412	283	34	59

Циклічні випробування трубного елемента виконані на випробувальній установці ЦДС пневмогідролічного кріогенного стенду Інституту проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України призначеного для дослідження труб та посудин тиску [8].

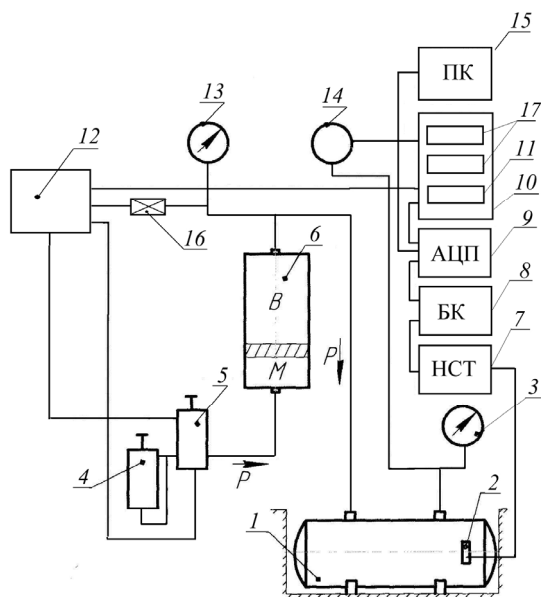


Рис. 2. Схема проведення випробувань

Схема проведення випробувань представлена на рис. 2, де: 1 – об'єкт випробування; 2 – тензометр; 3 – манометр на виході об'єкта випробування; 4 – регулятор швидкості навантаження; 5 – редуктор тиску; 6 – роздільна камера; 7 – нормалізатор сигналів тензометрів; 8 – блок комутації БК; 9 – аналогово-цифровий перетворювач АЦП; 10 – пульта управління; 11 – блок живлення БП; 12 – агрегат циклічного тиску; 13 – манометр на вході об'єкта випробування; 14 – перетворювач тиску типу MBS 3035 або SEN 3376; 15 – персональний комп'ютер; 16 – вентиль скидання тиску; 17 – регулятор тиску типу РД-5 (2 шт.), робоче середовище - вода.

Дослідження труб на ратчетинг проводилися з фіксацією поперечних і осьових деформацій в реальному часі. Датчики попарно розташовувались в центральній частині трубної секції в одному коловому перерізі в трьох точках із зміщенням по коловій координаті на  $120^\circ$ . В

рамках даної роботи використані фольгові константанові тензорезистори марки 2ФКПА-5-200-В (рис. 3). Величина зміни електричної напруги на вимірювальних плечах мостової схеми підсилювалася нормалізаторами сигналу тензодатчиків SG-3016 та, за допомогою аналогово-цифрового перетворювача АЦП типу Е14 і програмного забезпечення "Power Graph", реєструвалася на персональному комп'ютері. Величина деформацій розраховувалася як середнє значення по замірам в трьох точках.

**Програма випробувань** складалась із двох етапів: а) проведення гідровипробування на щільність за тиску 5 МПа, що відповідає кільцевим напруженням на рівні 0,5 від границі текучості матеріалу з витримкою 2 хв для оцінки якості виготовлення трубних елементів, перевірки герметичності системи та безпеки експерименту [9]; б) визначення мінімального внутрішнього тиску, що спричиняє появу пластичних деформацій в кільцевому напрямку з наступним асиметричним циклічним навантаженням на базі 100 циклів.



Рис. 3. Трубний елемент під час випробувань

**Результати та обговорення.** Випробування виконані за нормальних умов навколишнього середовища: температура – 18°C, атмосферний тиск – 750 мм.рт.ст., відносна вологість повітря – 40%. Внутрішній тиск, при якому фіксувалась поява пластичних деформацій у кільцевому напрямку склав  $P_{\min} = 10,5$  МПа. Тиск випробування приймався при досягненні кільцевих пластичних деформацій величини 0,03% і склав 10,8 МПа, що відповідає кільцевим напруженням  $\sigma_{\theta} = 300$  МПа. Параметри циклічного навантаження були наступними: значення максимального внутрішнього тиску 10,8 МПа; мінімального внутрішнього тиску в півциклі розвантаження – 1 МПа; амплітудне значення колових напружень циклу  $\sigma_a = 136$  МПа; середнє напруження циклу  $\sigma_m = 164$  МПа; коефіцієнт асиметрії  $R = 0,093$ . Для стабілізації максимального рівня напружень на кожному півциклі навантаження/розвантаження на крайніх пікових значеннях передбачалась затримка навантаження протягом 1 сек. При циклічному навантаженні внутрішнім тиском трубного елемента реалізовувався цикл пропорційного двовісного навантаження з відношенням пружних кільцевих напружень до осьових  $\sigma_{\theta} / \sigma_x = 2$ . Тому, очікувано передбачалось, що ефект ратчетингу буде проявлятися більш виражено для кільцевого напрямку деформування трубного елемента.

За результатами випробування, після обробки первинних даних були отримані діаграми деформування (діаграми ратчетингу) трубного елемента для кільцевого і осьового напрямків. На рис. 4 представлено діаграму ратчетингу труби в координатах кільцеві напруження – кільцеві деформації на базі 100 циклів навантаження. Результати випробувань (рис. 4) засвідчили, що на перших циклах навантаження (до 15 циклів) деформації ратчетингу є найбільшими і вони поступово зменшуються. Така поведінка спостерігається і при випробуванні зразків. Проте в трубному елементі зменшення деформацій ратчетингу відбувається нерівномірно на відміну від лабораторних зразків. На рис 5 наведено розподіл деформацій ратчетингу одночасно в кільцевому і осьовому напрямках. З рис. 5 видно, що осьові деформації на порядок менші за кільцеві. І якщо в кільцевому напрямку має місце ратчетинг, то в осьовому він майже не спостерігається, а відбувається лише перерозподіл деформацій, а саме їх зміщення в зону негативних значень.

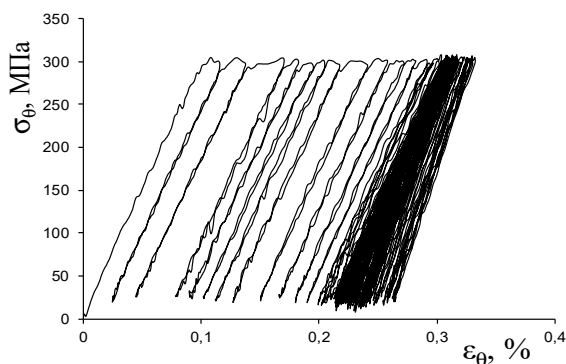


Рис. 4. Діаграма ратчетингу в кільцевому напрямку

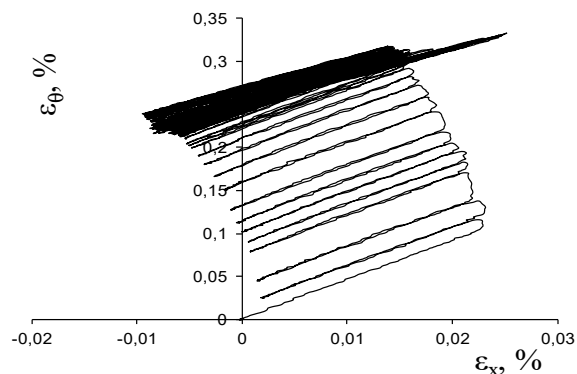


Рис. 5. Діаграма ратчетингу в координатах осьові деформації - кільцеві деформації

На рис. 6 представлена діаграма максимальних кільцевих деформацій циклу в залежності від числа циклів навантаження. Спостерігається припинення процесу росту деформацій після 25 циклів і повторна інтенсифікація після 70 циклу. На 100-му циклі навантаження накопичена деформація в центральній частині труби склала 0,33%. Деформування трубного елемента відрізняється від поведінки лабораторних зразків, для яких деформації ратчетингу ростуть з постійною швидкістю на другій усталеній стадії ратчетингу.

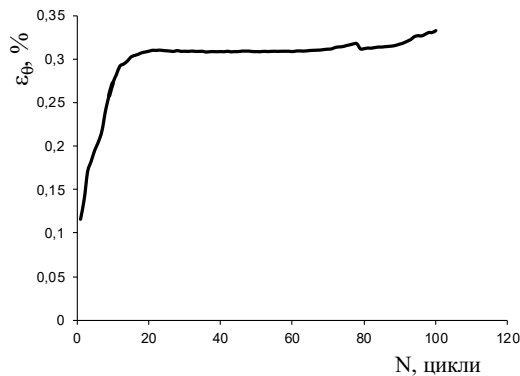


Рис. 6. Кільцеві деформації від циклу навантаження

**Висновки.** Відпрацьована методика експериментального дослідження ефекту ратчетингу елемента трубопроводу Ду 200 із сталі 20 при циклічному навантаженні внутрішнім тиском. Показано, що деформування трубного елемента в коловому напрямку відбувається подібно деформуванню трубчастих лабораторних зразків з деяким ступенем нерівномірності. В осьовому напрямку за двовісного навантаження реєструвались пластичні (залишкові) деформації протилежного знаку, які збільшувались зі збільшенням кількості циклів навантаження. Це наочно проявляється у зміні виду діаграми двовісного деформування - від початкової «віднульової-пульсуючої» до майже симетричної в кінці експерименту

(рис. 5). Максимальні деформації ратчетингу після 100 циклів навантаження склали 0,33%, а осьові пластичні деформації – 0,015%.

#### Список літератури

1. Hassan T. Ratcheting in cyclic plasticity, Part I: Uniaxial Behavior. / T. Hassan, S. Kyriakides // Int. J. Plasticity. – 1992. Vol 8. - P. 91–116.
2. Borodii M.V. An experimental study of ratcheting effect under multiaxial proportional loading / M.V. Borodii, V.O. Strzhalo, M.K. Kucher, E.L. Danyl'chuk, M.P. Adamchuk // Strength of Materials. – 2014. – 46 (1) – pp. 97–104.
3. Hassan, T. Influences of non-proportional loading paths on ratcheting responses and simulations by two recent cyclic plasticity models / T. Hassan, L. Taleb, S. Krishna // Int. J. Plasticity. – 2008. Vol. 24. –pp. 1863– 1889.
4. Borodii M.V. Modeling of the asymmetric low-cycle loading in the space of stresses // Strength of materials. – 1998 – 30 (5). – pp. 472–480.
5. Hassan T. Simulation of ratcheting responses of elbow piping components / T. Hassan, S.M. Rahman // Proceeding ASME Pressure Vessels and Piping Conference, 2009. Paper No. PVP2009-77819, 2009. – pp. 103–108.
6. Vishnuvardhan S. Ratcheting failure of pressurised straight pipes and elbows under reversed bending / S. Vishnuvardhan, G. Raghava, P. Gandhi, et al. // Int. J. Pres. Ves. Piping. – 2013. 105–106. – P.79–89.
7. Красовський А.Я. 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 та ін. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин. – Київ. Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України. 2006. – С. 309–314.
8. Strzhalo V. Estimation of the load carrying capacity of the bellows compensator for gas pipelines in the areas of mining production / V. Strzhalo, M. Zarazovskii, A. Bohdan, Z. Yaskovets, V. Antonchenko // Proceeding ASME Pressure Vessels and Conference, 2020. Vol. 3. Paper No. PVP2020-21738, 2020 - V003T03A019, 8 p.
9. ДНАОП 0.00-1.07-94. Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском. – Держнаглядхоронпраці України, 1998.

## Deformation of a pipeline element under cyclic loading by internal pressure

Strzhalo V.O., Borodii M.V., Adamchuk M.P., Yaskovets Z.S., Skakun S.A., Potapov I.K.

**Abstract.** An experimental study of the strain of a rectilinear segment of a pipeline Du 200 made of steel 20 under cyclic loading by internal pressure was carry out. The tests were performed on a pneumohydraulic stand under conditions of flat stress, normal temperatures, and load cycle asymmetry with registration of circular and axial elastic-plastic strain. The aim of the work was to test an experimental technique for studying the effect of ratcheting (unilateral accumulation of plastic deformations) on real structural elements when changing the modes of cyclic loading. According to the results of the study, curves of cyclic deformation (ratcheting) of the pipe in the circular and axial direction on the basis 100 cycles were obtained.

**Keywords.** Pipeline element; cyclic elastic-plastic deformation; ratcheting; experimental research.