

на поверхні сталі хемосорбційної плівки. В присутності інгібітора (0,8...2 г/л) опір корозійно-втомному руйнуванню сталі підвищується в середньому в 3 – 4 рази, при цьому змінюється характер корозійно-втомного руйнування. Аналіз макрофрактограм показав, що екстракт дубової стружки впливає на процес зародження втомної тріщини: у воді зародження від поверхні зразка відбувалося за міжзерним механізмом, а в інгібованому середовищі – за більш енергоємним кризьерним. На завершальному етапі руйнування енергоємність процесу в інгібованій воді теж вища, при цьому спостерігаються елементи, характерні для в'язкого руйнування на повітрі, а саме, круглі ямки відриву.

**Conclusions.** It was established that the efficiency of corrosion protection of steel in water by oak chip extract grows with increasing of inhibitor concentration. The extract is a mixed type action inhibitor which inhibited both electrode reactions by forming film on steel surface chemisorptions. The corrosion fatigue resistance of steel in the presence of inhibitor (0.8 – 2 g/l) is increased in average of 3 – 4 times and the mechanism of corrosion fatigue is changed. The macrofractographic analysis showed that oak chip extract affects crack initiation: it occurs by the intergranular mechanism from specimen surface in water and by the more energy transgranular one in the inhibited environment. The energy of corrosion fatigue under its final step of fracture is higher in inhibited environment than in water and the typical elements of ductile fracture on air namely, round holes tearing, in particular are observed.

#### Список використаної літератури

1. Похмурський, В.І. Корозійна втома металів та сплавів [Текст] / В.І. Похмурський, М.С. Хома. – Львів: Сполом, 2008. – 300 с.
2. Карпенко, Г.В. Про фізико-хімічну механіку металів [Текст] / Г.В. Карпенко. – К.: Наук.думка, 1973. – 173 с.
3. Бабей, Ю.И. Влияние соединений переходных металлов с бензотриазолом на коррозию и коррозионно-усталостное разрушение среднеуглеродистой хромистой стали [Текст] / Ю.И. Бабей, З.В. Слободян, Д.И. Семенишин // Защита металлов. – 1983. – № 4. – С. 617 – 620.
4. Композиції на основі екстрактів з кори та стружки дуба – інгібітори корозії середньовуглецевих сталей у воді [Текст] / З.В. Слободян, Л.А. Маглатюк, Р.Б. Купович, Я.М. Хабурський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2014. – № 5. – С. 58 – 66.
5. Хабурський, Я.М. Протикорозійні властивості екстрактів рослинної сировини в розчині соляної кислоти [Текст] / Я.М. Хабурський // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – № 1. – С. 116 – 121.
6. Фокин, М.Н. Методы коррозионных испытаний металлов [Текст] / М.Н. Фокин, К.А. Жигалова; под ред. Я.М. Колотыркина. – М.: 1986. – 80 с.
7. Антропов, Л.И. Теоретическая электрохимия [Текст] / Л.И. Антропов. – М.: Высшая школа, 1969. – 510 с.

Отримано 18.09.2015

УДК 539.4

**Петро Юхимець<sup>1</sup>, канд. техн. наук;  
Олексій Гопкало<sup>2</sup>, канд. техн. наук; Олена Гопкало**

<sup>1</sup>*Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України*

<sup>2</sup>*Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України*

**МАЛОЦИКЛОВА МІЦНІСТЬ ТРІЙНИКА ТРУБОПРОВОДУ З  
ПОШКОДЖЕННЯМИ**

**Резюме.** *Методом скінченних елементів (МСЕ) отримано дані про конструктивну концентрацію напружень та концентрацію напружень залежно від геометричних параметрів об'ємного поверхневого дефекту (ОПД) і місця його розташування на поверхні рівнопрохідного трійника зі сталі 10. Проведено циклічні гідравлічні випробування трійника зі штучно нанесеними ОПД, що імітували корозійно-ерозійні пошкодження. Експериментально встановлено відмінності при статичному та циклічному деформуванні металу в характерних зонах трійника, які зумовлені структурною анізотропією деформації металу. Фактичне число циклів до утворення наскрізної тріщини в зоні дефекту задовільно узгоджується з результатами прогнозу з використанням експериментальних кривих втоми металу трійника, а також і з результатами фрактографічних досліджень.*

**Ключові слова:** *тріюник, об'ємний поверхневий дефект, малоциклова втома, концентрація напружень.*

## PetroYukhymets, Oleksii Gopkalo, Olena Gopkalo

### Low-cycle strength of damaged T-joint

**Summary.** *Stress-strain state and low-fatigue strength of full-scale sample of T-joint with artificial volumetric surface defects under hydraulic inner pressure loading as well as mechanical, cyclic and structural features of material from its different zones have been investigated.*

*Using finite element method (FEM) data on structural stress concentration and stress concentration caused by geometric parameters of the defect and its location on the surface of flush T-joint made from steel 10 were obtained.*

*The tensile and low-cycle tests of material were carried out. The difference in deformation of metal from typical areas of T-joint under static and cyclic loading was established. It is caused by variant morphology of the metal microstructure (structural anisotropy of deformation) in its specific areas that was formed during manufacturing process of the T-joint. Differences of metal microstructure in characteristic areas of T-joint resulted in strengthening and significant loss of the plasticity in one of the zones and corresponded reducing (4..5 times) of the cyclic durability of this area relatively to other investigated areas.*

*Cyclic hydraulic test of T-joint with the artificial volumetric surface defects that simulated corrosion-erosion damage was fulfilled. It was revealed that strain in the defect located along the coupling line of main pipe and branch in the area of structural stress concentration under internal pressure is 2 – 3 times higher than strain in defect with the same geometric parameters at the surface of straight pipe.*

*On the base of investigation of the defect fracture area the mechanism of crack propagation was established. It includes not only formation of facets of brittle and quasibrittle transcrystallite fracture, but regions of the fatigue grooves as well. Number of the groove steps corresponds to the number of cycles for formation of through wall crack in the defect.*

*The failure number of cycles in the area of the defect is satisfactorily consistent with the predicted results using experimental and calculated fatigue curves on the one hand, and results of fractography on the other.*

*It was shown during assessment of the damaged T-joint mechanical properties of metal in its characteristic areas, structural stress concentration and the concentration of stress caused by the presence of defect must be taken into account.*

**Key words:** *T-joint, volumetric surface defect, low-cycle fatigue, stress concentration.*

**Вступ.** При визначенні товщини стінки трійника трубопроводу основним силовим фактором є внутрішній тиск продукту, що транспортується [1], при дії якого напруження в його окремих зонах значно перевищують напруження у прямій трубі такого ж діаметра та товщині стінки. Напруження в зонах конструктивної концентрації напружень трійника значно підвищуються при виникненні на його поверхні ОПД, що викликає потенційну загрозу малоциклового руйнування, оскільки трубопроводи зазнають циклічні навантаження в процесі перекачування продукту [2]. У зв'язку з зазначеним, в даній роботі зроблена спроба розрахунково-експериментального оцінювання циклічної міцності трійника зі штучними дефектами в зонах конструктивної концентрації напружень по лінії сполучення основної труби з патрубком при навантаженні його циклічним внутрішнім тиском.

**Результати дослідження НДС трійника МСЕ.** Розрахунками МСЕ встановлено, що підвищення максимальних напружень у безшовному трійнику

відбувається при збільшенні діаметра патрубку та зменшенні як товщини останнього, так і радіуса сполучення труби з патрубком. Найбільше зростання напружень відмічено при одночасному пропорційному зниженні товщини стінки труби та патрубка трійника. В якості прикладу в таблиці 1 наведено дані залежності коефіцієнта концентрації напружень (ККН) для різних зон трійника від діаметра патрубка.

Таблиця 1

Залежність ККН від діаметра патрубка

Трійник (*R=50 мм в усіх випадках)	$\alpha_\sigma^{**}$		
	Зона 5		Зона 2-3
	Внутрішня поверхня	Зовнішня поверхня	Зовнішня поверхня
426x12-168x12	3,4	1,2	2,0
426x12-299x12	4,3	2,4	2,6
426x12-426x12	5,7	3,1	5,7

\*R – радіус сполучення труби з патрубком;

\*\*  $\alpha_\sigma$  – ККН визначається як  $\sigma_i^{max}/\sigma_i^m$ , де  $\sigma_i^m$  – інтенсивність напружень у трубі 426x12.

Максимальні напруження в дефекті (табл. 2), розташованому в зонах конструктивної концентрації напружень трійника 2–3 та 5 (рис. 1), підвищуються зі зростанням довжини та глибини дефекту та при зменшенні його ширини. Концентрація напружень у дефектах, розташованих у вказаних зонах рівнопрохідного трійника в 2,5...3,7 раза перевищує відповідні значення для дефектів з тими ж геометричними параметрами у випадку їх розташування на прямій трубі.

Таблиця 2

Залежність НДС від геометричних параметрів ОПД при дії внутрішнього тиску P = 1 МПа

Трійник	Дефект, мм			Зона	Поверхня	$\sigma_i$ , МПа	$\alpha_\sigma$ (МСЕ)	$\alpha_\sigma^{T**}$ [4]	$\alpha_\sigma/\alpha_\sigma^T$
	Дов- жина	Ши- рина	Гли- бина						
426x12-426x12	–	–	–	5	Внутрішня	85,5	5,7	–	
	60	40	8			204,8	13,7	4,2	3,3
	50	30	8			191,8	12,8	4,6	2,8
	50	40	6			151,6	10,1	3,0	3,4
	50	40	8			169,1	11,3	3,8	3,0
	–	–	–			46,3	3,1		
	50	40	8	Зовнішня	164,9	11,0	3,8	2,9	
	50	30	8		193,9	13,0	4,6	2,8	
	60	40	8		183,8	12,3	4,2	2,9	
	50	40	6		128,8	8,6	3,0	2,9	
	–	–	–		84,6	5,7	–		
	40	50	8		Зовнішня	158,7	10,6	3,8	2,8
	50	0	8	167,3		11,2	3,8	2,9	
	50	30	8	172,6		11,6	4,6	2,5	
	40	30	8	170,3		11,4	4,1	2,8	
	40	50	6	136,8		9,2	2,5	3,7	
	–	–	–	2–3					

\* довжина дефекту в зоні 5 визначається його протяжністю вздовж дуги сполучення труби з патрубком, в зоні (2 – 3) – вздовж осі труби;  
 \*\*  $\alpha_{\sigma}^m$  значення ККН в ОПД на прямій трубі.



**Рисунок 1.** Загальний вигляд трійника з зовнішнім штучним дефектом (стрілками показано напрямки вирізки лабораторних зразків в досліджуваних зонах 1, 2, 3, 4, 5)

**Figure 1.** General view of the T-joint with outer artificial defect (the arrows indicate the cutting directions of the specimens in zones 1, 2 – 3, 4 and 5)

Проведені розрахунки МСЕ впливу різних схем закріплення кінців трійника на його НДС показали, що жорстке закріплення одного із торців труби, яке було реалізовано в даному експерименті, обумовлює підвищення до 10% напружень для зон 5 та 2 – 3 відносно до інших можливих варіантів закріплення.

**Методика експериментальних досліджень.** В якості натурального об'єкта для експериментальних досліджень був використаний рівнопрохідний трійник Ø426x12 мм [3]. Дефекти на досліджуваних поверхнях трійника наносили шляхом електрохімічного травлення. Фактичні геометричні параметри нанесених дефектів наведено в таблиці 3.

**Таблиця 3**

Розміри дефектів та максимальні деформації в них

Місце розташування дефекту		Довжина, мм	Ширина, мм	Глибина, мм	$\epsilon_{i \max} \times 10^4$ (експеримент)	$\epsilon_{i \max}^4 \times 10^4$ (МСЕ)	$\epsilon_{i \max}$ (МСЕ)
Зона	Поверхня						$\epsilon_{i \max}$ (експеримент)
5	Внутрішня	43	27	7,10	7,7	8,7	1,13
	Зовнішня	35	55	8,70	4,0	7,1	1,78
2 – 3	Зовнішня	48	39	7,07	5,8	7,9	1,36

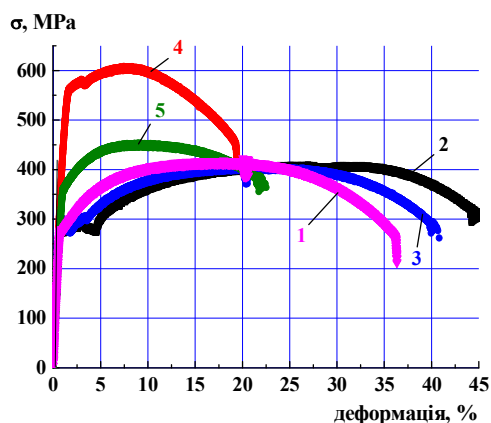
Для експериментального дослідження НДС трійника використовувався метод тензометрії. Тензорезистори з базою вимірювання 3 мм наклеювали на поверхню штучного дефекту з урахуванням напрямку максимальних розрахункових напружень.

Експериментальні дослідження механічних властивостей металу окремих зон трійника проводили відповідними випробуваннями лабораторних зразків з розмірами робочої частини Ø8x28 мм. Слід зазначити, що в процесі виготовлення трійника, шляхом витягування патрубка із труби, товщина стінки труби у патрубку (зона 1)

складала 9,4 мм, а в зоні 4 (протилежній патрубку) – 13,7 мм. Випробування на розтяг та малоциклову втому (МЦВ) проводили на електрогідравлічній машині. Циклічне навантаження зразків здійснювали згідно з вимогами стандартів ISO 12106 – 2003 та ASTM E 606 – 80 та можливостям випробувальної машини з постійною швидкістю деформування 0,1%/сек [4, 5] по симетричному трикутному осьовому (розтягу-стиску) циклу деформування з контролем амплітуди деформації (жорстке навантаження).

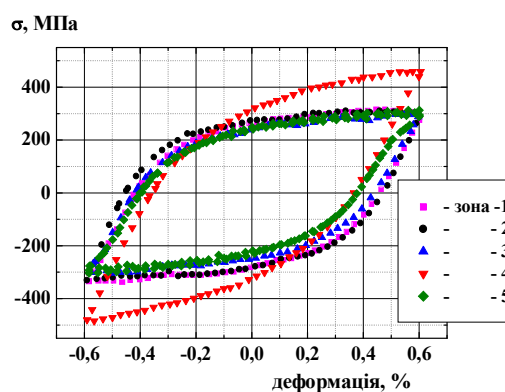
Металографічні дослідження мікроструктури сталі характерних зон трійника проводили на оптичному інвертованому мікроскопі «АХІОVERT-40 МАТ». Вимірювання мікротвердості проведено на мікротвердомірі ПМТ-3 згідно з ГОСТом 9450 – 76 при навантаженні 0,5 Н. Фрактографічні дослідження поверхні руйнування розкритої наскрізної тріщини після натурних випробувань трійника проводили на модернізованому растровому електронному мікроскопі РЕМ – 100У.

**Результати експериментальних досліджень.** На рис. 2 наведені діаграми розтягу, а на рис. 3 – діаграми циклічного деформування зразків з характерних зон трійника.



**Рисунок 2.** Діаграми розтягу зразків металу, вирізаних із характерних зон трійника (1 – 5 зони трійника див. рис. 1)

**Figure 2.** Tensile tests diagrams of the specimens cut from specific zones of the T-joint (1..5 – T-joint zones, see Figure 1)

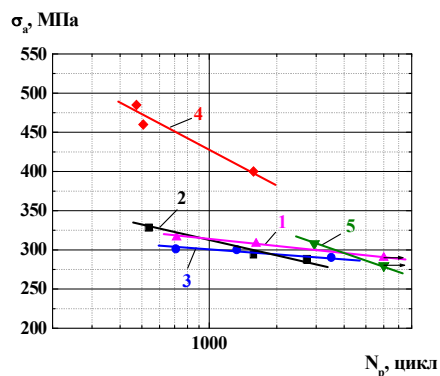


**Рисунок 3.** Діаграми циклічного деформування (при  $N_p/2$ .) лабораторних зразків металу характерних зон трійника при амплітуді циклічної деформації 0,6% (1 – 5 зони трійника, див. рис. 1)

**Figure 3.** Cyclic deformation diagrams ( $N_p/2$ ) of specimens cut from specific zones of the T-joint at cyclic strain amplitude 0.6%. (1..5 – T-joint zones, see Figure 1)

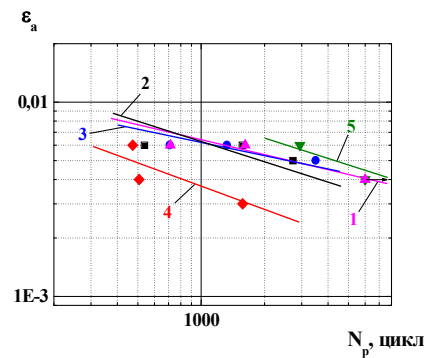
Із наведених діаграм випливає, що технологічні фактори, які пов'язані з виготовленням трійника і, як наслідок, особливостями мікроструктури (що показано нижче), суттєво впливають на характер діаграм та абсолютні значення характеристик опору статичному та циклічному деформуванню металу в його характерних зонах. Діаграма розтягу зразка металу зони 4 (ділянка протилежна патрубку трійника) має ознаки суттєвого зміцнення. Наприклад, границя міцності металу зони 4 приблизно на 50% вища, ніж для металу зони 2 – 3 в напрямку 3, а умовна границя текучості відповідно вища приблизно на 80%. При цьому відносне видовження зразка металу зони 4 на 50% менше, ніж для зразків металу зони 2 – 3 в напрямку 3. Суттєве зміцнення та зниження в 2 рази вихідної пластичності металу зони 4 в умовах циклічного навантаження з

постійною амплітудою деформування  $\varepsilon_a$  призводить до підвищення на 30 – 50% амплітуди напружень  $\sigma_a$  (рис. 4) та зниження в 7 – 9 разів циклічної довговічності цієї зони відносно інших досліджуваних зон (рис. 5).



**Рисунок 4.** Залежність циклічної довговічності зразків металу досліджених зон трійника від амплітуди напружень  $\sigma_a$  (1 – 5 зони трійника див. рис. 1)

**Figure 4.** Dependence of cyclic durability of the specimens from specific zones of the T-joint on stress amplitude  $\sigma_a$  (1..5 – T-joint zones, see Fig.1)



**Рисунок 5.** Залежність циклічної довговічності зразків металу трійника від амплітуди пружно-пластичної деформації за цикл  $\varepsilon_a$  (1 – 5 зони трійника див. рис. 1)

**Figure 5.** Dependence of cyclic durability of the specimens of T-joint metal on elastic-plastic amplitude  $\varepsilon_a$  (1..5 – T-joint zones, see Fig.1)

Кінетика максимальних та мінімальних значень циклічних напружень та циклічної умовної границі текучості при циклічному деформуванні зразків металу в жорсткому режимі навантаження, вирізаних із зони 4, характерна для циклічно знеміщених сталей, а для решти досліджених зон – для циклічно стабільних сталей.

Металографічні дослідження мікроструктури металу трійника проводили у характерних зонах – 1, 4 та 5. Схема вирізки заготовок для мікрошліфів з труби трійника (зони 1 і 4) та типові ділянки мікроструктури металу трійника в двох взаємно перпендикулярних січеннях представлені на рис. 6. Двосторонніми стрілками показано напрямки випробовувань на МЦВ.

Мікроструктура металу трійника в зоні 1 являє собою феритно-перлітну суміш зі сферичним перлітом та дрібнодисперсними карбідами в обох січеннях. Ферит характеризується поліедричною морфологією із середнім розміром зерна  $\sim 12\mu\text{m}$  при загальній різнозерненості 4-25 $\mu\text{m}$ , як у поздовжньому (II) (рис.6 в), так і в поперечному січенні ( $\perp$ ) (рис. 6 б). Мікроструктура металу в зоні 5 аналогічна, тоді як в зоні 4 зерна фериту характеризуються переважно неправильною формою в поздовжньому січенні (II) (рис. 6 г) та вираженою структурною анізотропією деформації в поперечному січенні ( $\perp$ ) (рис. 6 д).

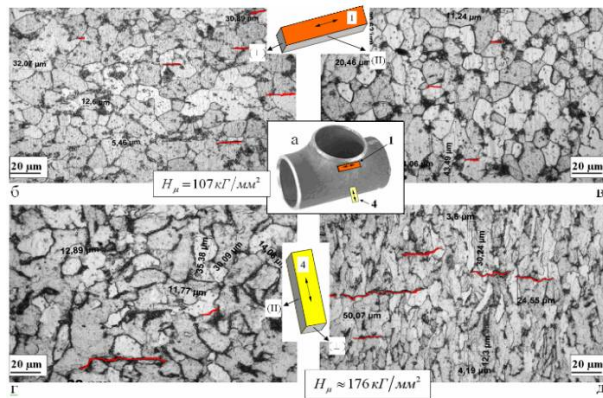


Рисунок 6. а – д. Мікроструктура металу трійника в зонах 1 та 4

Figure 6. а – д. Microstructure of the T-joint metal in zones 1 and 4

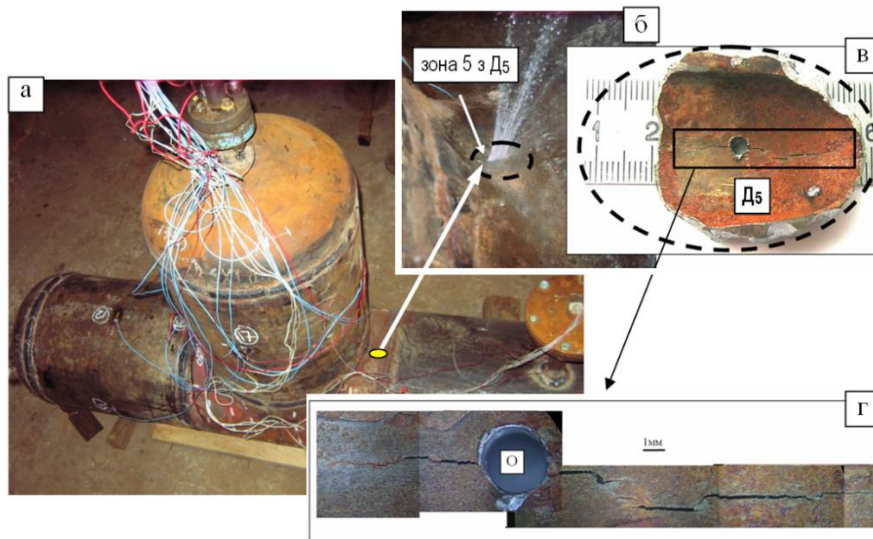
Як у зоні 1, так і в зоні 4 спостерігаються мікротріщини, орієнтовані паралельно зовнішній поверхні досліджуваних зон. При цьому їх кількість та середня довжина переважає в сеченнях зони 4.

В сеченні зони 5 мікротріщини орієнтовані під кутом  $15 - 20^\circ$  до зовнішньої поверхні. Проведені металографічні дослідження дозволили встановити, що відмінності механічних властивостей металу трійника в різних зонах, при статичному та циклічному навантаженнях, зумовлені структурною анізотропією деформації металу зони 4 (протилежної патрубку трійника) та більш високими значеннями мікротвердості в цій зоні відносно зони 1 патрубку. Мікротвердість фериту в зоні 1 коливається у межах  $HV_{0.05} \sim 100-120$  кгс/мм<sup>2</sup> при середньому значенні  $HV_{0.05} \sim 107$  кгс/мм<sup>2</sup>, а в зоні 4 –  $HV_{0.05} \sim 172-198$  кгс/мм<sup>2</sup> при середньому значенні  $HV_{0.05} \sim 176$  кгс/мм<sup>2</sup>.

Циклічне навантаження герметизованого натурального зразка трійника здійснювали пульсуючим внутрішнім тиском води  $0,2 - 7,0$  МПа з частотою 4-5 циклів за хвилину. Розгерметизація натурального зразка відбулася після напрацювання 3060 циклів у результаті утворення наскрізної тріщини в зоні 5 (рис. 7 а – б), після чого випробування були припинені.

Для фрактографічних досліджень поверхні тріщини із зони 5 вирізували фрагмент металу з тріщиною (рис. 7 в), яку розкрили при температурі скрапленого азоту. Фрактографічний аналіз поверхні руйнування внутрішнього дефекту (Д<sub>5</sub>) показав, що в процесі випробувань в зоні 5 з внутрішнього боку внутрішньої сторони труби трійника зародилася багатоосередкова тріщина, яка у центральній частині дефекту проросла в наскрізну магістральну (рис. 8 а). Електронно-мікроскопічними дослідженнями встановили мікромеханізми росту магістральної тріщини в межах вирізаного фрагменту темплету. На мікрорівні поряд з фасетками крихкого та, частково, квазікрихкого транскристалітного руйнування мають місце ділянки втомних борозенок. Встановлено, що фактичні значення кроку борозенок складають  $(1,5 - 1,8) \times 10^{-3}$  мм (рис. 8 б).

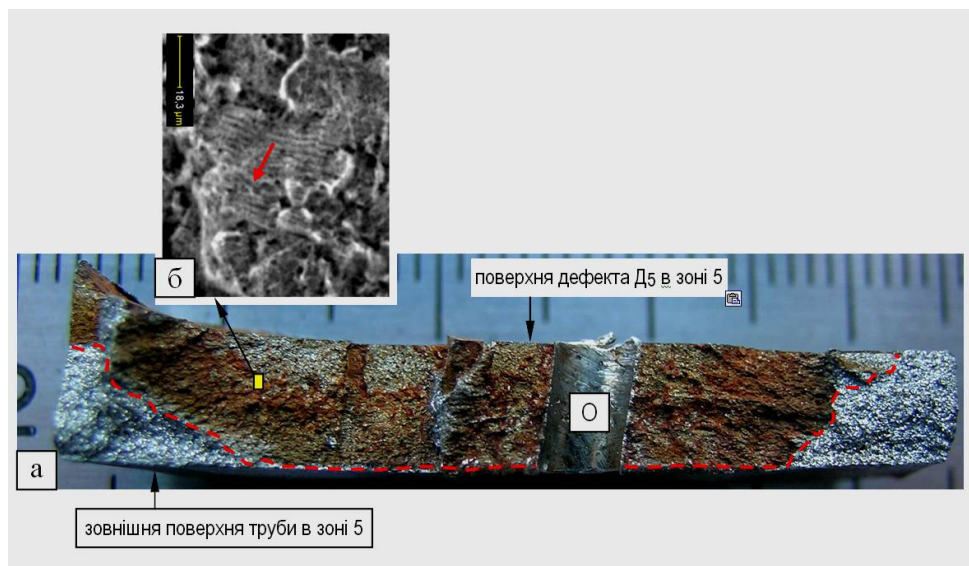




**Рисунок 7** а – г. Утворення наскрізної тріщини в зоні 5 (з внутрішнім дефектом Д<sub>5</sub>) натурального зразка (в – вид з внутрішнього боку трійника вирізаного фрагменту металу (темплета) з дефектом Д<sub>5</sub> та тріщиною в ньому; г – панорамне зображення профілю тріщини на поверхні дефекту; О – технологічний отвір для вилучення темплета з трійника)

**Figure 7** а – г. Formation of wall through crack in zone 5 (inner defect D<sub>5</sub>) of full scale specimen (в – view of fragment with defect and the crack; О – place of fragment cutting)

Якщо прийняти, що крок борозенок співпадає з макрошвидкістю росту втомної тріщини при проведених натурних випробуваннях [8], то встановленому кроку борозенок у межах досліджуваної глибини тріщини відповідає 2667...3125 число циклів до утворення наскрізної тріщини у зоні дефекту (зона 5) натурального зразка.



**Рисунок 8.** Макрофрактограма поверхні розкритої тріщини (пунктирна лінія – межа фронту магистральної тріщини) (а); типова мікрофрактограма руйнування (стрілка – напрямок руху тріщини) (б)

**Figure 8.** Formation of wall through crack in zone 5 (inner defect D<sub>5</sub>) of full scale specimen (b – view of fragment with defect and the crack; О – place of fragment cutting)

**Аналіз результатів.** Співставлення результатів вимірювання та розрахунку деформацій в дефектах показало, що розрахункові деформації перевищували



експериментальні величини в дефектах зон 2 – 3 та 5 (всередині та зовні) – в 1,13 1,36 та 1,78 рази, відповідно (див. табл. 3). Відмінності між розрахунковими та вимірними величинами є ймовірно, наслідком різновимірності трійника, яка не враховувалася при побудові геометричної моделі.

У випадку розташування дефекту на поверхні прямої труби концентрація напружень  $\alpha_{\sigma T}$ , визначається за напівемпіричною залежністю [7]

$$\alpha_{\sigma T} = 1.4 \cdot \left[ 1 + \frac{2 \frac{b}{d} [1.12 - 0.48 \frac{b}{c} + 0.13 \frac{b}{c} (3 \frac{b}{c} - 2 - \frac{b}{h})]}{1 - \frac{b}{h} (1 - 0.75 \frac{b}{c})} \sqrt{1 + \frac{5\pi\lambda^2}{32}} \right],$$

де  $b, c, d$  – розмір напівосей еліпсоїда, що охоплює дефект зовні;  
 $h$  – товщина стінки.

$\lambda$  – функція, яка враховує кривизну поверхні,

$$\lambda^2 = \frac{c^2}{rh} [12(1 - \mu^2)]^{1/2},$$

де  $r$  – радіус труби;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Концентрація напружень у дефектах з відповідними розмірами на поверхні труби  $\varnothing 426 \times 12$  виявилася суттєво нижче експериментальних  $\alpha_{\sigma e}$  (в 2,2..2,9 рази), так і розрахункових  $\alpha_{\sigma MCE}$  значень ККН у дефектах на поверхні трійника. Коефіцієнти концентрації напружень  $\alpha_{\sigma e}$ , отримані експериментально, в усіх випадках виявилися нижчими, ніж розраховані МСЕ.

Таблиця 4

Концентрація напружень у дефектах

Місце розташування дефекту		$\alpha_{\sigma T}$	$\alpha_{\sigma e}^*$	$\alpha_{\sigma MCE}^*$	$\frac{\alpha_{\sigma e}}{\alpha_{\sigma T}}$	$\alpha_{\sigma K}$	$\alpha_{\sigma K2}^{***}$	$\alpha_f = \alpha_{\sigma T} \cdot \alpha_{\sigma K}^{**}$	$\alpha_{f2} = \alpha_{\sigma T} \cdot \alpha_{\sigma K2}^{***}$	$\frac{\alpha_{\sigma f}}{\alpha_{\sigma e}}$	$\frac{\alpha_{\sigma f2}}{\alpha_{\sigma e}}$
Зона	Поверхня										
5	Внутр.	4,1	11,8	13,4	2,9	5,7	3,4	23,4	13,9	2,0	1,2
5	Зовн.	2,8	6,2	10,9	2,2	3,1		8,7	9,5	1,4	1,5
2-3	Зовн.	3,4	8,9	12,2	2,6	5,7		19,4	11,6	2,2	1,3

\* – відносно інтенсивності деформацій у прямій трубі 426x12;

\*\*  $\alpha_{\sigma K}$  – коефіцієнт конструктивної концентрації напружень (див. табл. 4);

\*\*\*  $\alpha_{\sigma K2}$  – коефіцієнт конструктивної концентрації напружень згідно з [8].

Значення повного ККН у дефекті трійника  $\alpha_e$ , визначеного як добуток ККН у прямій трубі  $\alpha_{\sigma T}$  та конструктивного ККН у трійнику (МСЕ), перевищують експериментальні значення ККН у дефектах в 1,4...2,2 рази. Водночас, величина повного ККН  $\alpha_{f2}$ , визначеного з використанням конструктивного ККН  $\alpha_{\sigma K2}$  згідно з [8], має ближчу відповідність з експериментальними значеннями ККН (перевищення складає 1,2..1,5 рази). Слід зазначити, що при розрахунку  $\alpha_{f2}$  величина конструктивного

ККН всіх представлених випадках приймалася в запас міцності, що дорівнювала ККН на внутрішній поверхні зони 5.

З використанням отриманих експериментальних даних було виконано оцінювання впливу нанесених дефектів на довговічність натурального зразка трійника. Розрахунок амплітуди максимальної деформації у дефекті проводився на основі максимальних експериментальних деформацій (визначених тензометрією) та ККН в пружній області навантаження, а також механічних характеристик у відповідних зонах трійника з використанням інтерполяційного співвідношення для коефіцієнта пружно-пластичних деформацій [9].

$$K_e = \frac{\alpha_{\sigma}^{2/1+m} \cdot \left(\bar{\sigma}_n\right)^{(1-m)/(1+m)}}{\left(\alpha_{\sigma} \cdot \bar{\sigma}_n\right)^{\frac{n(1-m)}{(1+m)} \left[1 - \left(\bar{\sigma}_n / \alpha_{\sigma}\right)\right]}}$$

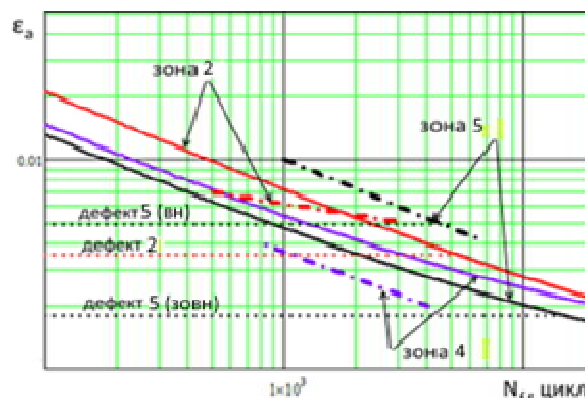
де  $\bar{\sigma}_n$  – відносні номінальні напруження в циклі навантаження

$$\bar{\sigma}_n = \frac{\Delta\sigma_{in}}{\sigma_y}$$

$n$  – постійна матеріалу,  $n = 0,5$ ;

$m$  – коефіцієнт зміцнення матеріалу в пружно-пластичній області.

На рис. 9 наведені розрахункові, згідно з рівнянням Лангера [10], та експериментальні криві втоми металу характерних зон трійника, з використанням яких було виконано оцінювання впливу дефектів на довговічність натурального зразка.



**Рисунок 9.** Залежність циклічної довговічності зразків металу досліджених зон трійника від амплітуди пружно-пластичної деформації за цикл  $\varepsilon_a$ . Експериментальні (штрих пунктирні лінії) та розрахункові (суцільні лінії) криві втоми. Лініями у вигляді точок помічено рівень максимальних деформацій у дефекті

**Figure 9.** Dependence of fatigue strength of specimens from specific zones of the T-joint on elastic-plastic strain amplitude  $\varepsilon_a$ . Experimental (dash-dot lines) and calculated (continuous lines) fatigue curves. Dotted lines – maximal strain in defect

Експериментальні криві втоми побудовані за результатами випробувань на МЦВ лабораторних зразків. Розрахунок циклічної довговічності проводили згідно з рівнянням [10]

$$\varepsilon_a = \left\{ \left[ \frac{\ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right)}{4e_t N_f^n} \right] + \frac{\sigma_1}{\sigma_t} \right\} \cdot e_{ti},$$

де  $\varepsilon_a$  – амплітуда деформації в циклі навантаження;

$\psi$  – відносне звуження шийки при руйнуванні;

$e_t$  – деформація границі текучості;

$N_f$  – число циклів до руйнування;

$\sigma_1$  – межа втоми матеріалу;

$\sigma_t$  – границя текучості;

$e_{ti}$  – інтенсивність деформації відповідна границі текучості;

$n$  – показник степені,  $n = 0.5$ .

Фактичне число циклів до утворення наскрізної тріщини у зоні 5 дефекту трійника –  $N_f = 3060$  задовільно узгоджується, як з результатами прогнозу  $N_{fnp} \approx 4400$  циклів із використанням експериментальної кривої втоми (див. рис. 9 – накопичене пошкодження  $d = N_f/N_{fnp} \approx 0,70$ ), так і з результатами фрактографічних досліджень, згідно з якими встановленому кроку борозенок  $(1,5 - 1,8) \times 10^{-3}$  мм (у межах досліджуваної глибини наскрізної тріщини) відповідає 2667...3125 число циклів навантаження.

**Висновки.** Експериментально встановлено, що деформації, які виникли у дефекті, розташованому в зонах конструктивної концентрації напружень по лінії сполучення патрубку та основної труби, під дією внутрішнього тиску в 2 – 3 рази вищі за аналогічні деформації в дефектах з такими ж геометричними параметрами на поверхні прямої труби.

Встановлено суттєві відмінності опору різних зон трійника статичному та циклічному навантаженню. Зміцнення та втрата при цьому вихідної пластичності однієї з зон трійника зумовили зниження її циклічної довговічності в 4, 5 рази відносно інших досліджених зон.

Відмінності механічних властивостей металу трійника в різних зонах, при статичному та циклічному навантаженнях, зумовлені різною морфологією мікроструктури металу, яка сформувалася в процесі технологічних особливостей виготовлення трійника.

Число циклів до руйнування в зоні дефекту натурального зразка задовільно узгоджуються з оцінкою його довговічності, що базується на експериментальних, у тому числі фізичних та розрахункових дослідженнях НДС.

При оцінюванні міцності трійника з ОПД необхідно враховувати механічні властивості металу в його характерних зонах, конструктивну концентрацію напружень та концентрацію напружень від самого дефекту.

**Conclusions.** It was experimentally established that strain in the defect located along the coupling line of main pipe and branch of T-joint in the area of structural stress concentration under internal pressure is 2 - 3 times higher than strain in defect with the same geometric parameters at the surface of straight pipe.

The difference in deformation of metal from typical areas of T-joint under static and cyclic loading is the result of strengthening and significant loss of the plasticity of one of the T-joint area (located opposite to branch) that resulted in reducing (4..5 times) of the cyclic durability of this area relatively to other investigated areas.

Main reason of the phenomenon of different deformation of metal from typical areas of T-joint under static and cyclic loading is variant morphology of the metal microstructure in its specific areas that was formed during manufacturing process.

The actual failure number of cycles of the full-scale specimen with defect satisfactorily corresponds the predicted results based on experimental and calculated data of stress-strain investigations.

During assessment of the damaged T-joint mechanical properties of the metal in its characteristic area, structural stress concentration and the concentration of stress caused by the defect presence must be taken into account.

#### **Список використаної літератури**

1. СНиП 2.05.06-85 (2000) Магистральные трубопроводы.
2. Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении. Обзорная информация. Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов [Текст] / М.И. Волский, А.С. Аистов, А.П. Гусенков, Л.К. Гуменный. – М.: – ВНИИОЭНГ, 1979.
3. ГОСТ 17376-2001 Тройники бесшовные приварные.
4. Гопкало, О. Визначення опору малоцикловому навантаженню конструкційної сталі [Текст] / О. Гопкало // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2014 – № 3 – (75). – С. 66 – 77.
5. Fischmeister H.F., Danzer R., Buchmayr B., Life time prediction models. Fat. Fract. Eng. Mat. Struct. 8 (1986), 495 – 549.
6. МР 189-86. Расчеты и испытания на прочность. Метод оценки сопротивления металлических материалов усталостному разрушению по шагу усталостных бороздок [Текст] – М.: ВНИИНМАШ, 1986. – 36 с.
7. Гарф, Э.Ф Концентрация напряжений на участках коррозионных повреждений трубопроводов [Текст] / Э.Ф. Гарф, С.В. Кобельский, П.С. Юхимец // Автоматическая сварка. – 2000 – № 6.
8. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст] – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
9. Когаев, В.П Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность [Текст] / В.П Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
10. Серенсен, С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. [Текст] / С.В. Серенсен. – М.: Атомиздат, 1975. – С. 192.

*Отримано 21.08.2015*

*УДК 620.193:691.328*

**Мирослава Греділь, канд. техн. наук**

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України*

## **ОСОБЛИВОСТІ РУЙНУВАННЯ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНОЇ АРМАТУРИ ЗА НАВОДНЮВАННЯ У МОДЕЛЬНОМУ РОБОЧОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

*Резюме.* Досліджено особливості руйнування перлітної сталі різних етапів процесу холодного волочіння включно з вихідним станом та кінцевим комерційним продуктом (попередньо напруженим дротом) на повітрі та за наводнювання у модельному робочому середовищі рН 12,5. Пластичність сталі підвищується зі ступенем холодного волочіння, що пояснюють поступовим переорієнтуванням перлітних колоній у напрямі волочіння, а на останніх етапах знижується. За наводнювання отримано стабільно низькі значення відносного звуження, що свідчить про високу чутливість досліджуваної сталі до водневого окрихчення, яке також проявилось у множинному мікророзтріскуванні біля поверхонь руйнування. Втрата пластичності сталі внаслідок впливу водню менша у випадку комерційного високоміцного дроту порівняно з