

4. Гигиняк Ф.Ф., Булах П.А. Усовершенствование упруго-вязкопластической модели деформирования с учетом повреждаемости // Пробл. прочности. – 2012. – № 4. – С. 58-66.

## МАЛОЦИКЛОВА МІЦНІСТЬ ТРІЙНИКА З ПОШКОДЖЕННЯМИ

П.С.Юхимець\*, О.П. Гопкало\*\*, О.Є. Гопкало\*\*

\*Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона (Україна)

\*\*Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка (Україна),

Investigated 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.

**Вступ.** Проведеними розрахунками методом скінченних елементів (МСЕ) отримані дані про конструктивну концентрацію напружень та концентрацію напружень від геометричних параметрів дефекту і місця його розташування на поверхні рівнопрохідного трійника. У відповідності з отриманими даними в характерних зонах натурального зразка (трійника) були штучно нанесені об'ємні поверхневі дефекти, що імітували корозійно-ерозійні пошкодження. Для визначення статичних та циклічних властивостей металу в цих зонах були виготовлені та випробувані лабораторні зразки.

**Результати дослідження НДС трійника МСЕ.** Для досліджень були вибрані наступні зони: 1 – на патрубку, 2 – та 3 у двох взаємно перпендикулярних напрямках на лінії сполучення патрубка та основної труби у центральній частині трійника, 4 – розташована напроти патрубка та 5 – по лінії сполучення в місті її перетину з поздовжньою площиною симетрії трійника (рис. 1). Розрахунок амплітуди максимальної деформації у дефекті проводився на основі максимальної експериментальної деформації та коефіцієнта концентрації напружень (ККН) у пружній області навантаження, а також механічних властивостей відповідної зони трійника з використанням інтерполяційного співвідношення для коефіцієнта пружно-пластичної деформації [1].



Рис.1. Загальний вигляд трійника з штучним дефектом (стрілками показано напрямок вирізки лабораторних зразків в досліджуваних зонах 1, 2, 3, 4, 5).

Проведені чисельні розрахунки показали, що при навантаженні внутрішнім тиском максимальні конструктивні напруження виникають в зонах 2 та 5. Підвищення максимальних напружень в трійнику відбувається при збільшенні діаметра патрубка, зменшенні його товщини та радіуса сполучення основної труби з патрубком. Максимальні напруження в дефекті,

розташованому в зоні конструктивної концентрації напружень трійника, підвищуються з зростанням довжини та глибини дефекту та при зменшенні його ширини. Концентрація напружень в дефектах, розташованих в указаних зонах трійника, в 2,5...3,7 рази перевищує відповідні значення для дефектів з тими ж геометричними параметрами у випадку їх розташування на прямій трубі.

**Методика експериментальних досліджень.** В якості натурального об'єкта для експериментальних досліджень був використаний рівнопрохідний трійник Ø426x12 мм (Ст10 ГОСТ 1050-88), фактичні значення товщини стінки складала 9,8...13,2 мм. Дефекти на

досліджуваних поверхнях трійника наносили штучно шляхом електрохімічного травлення. Фактичні геометричні параметри нанесених дефектів для різних досліджуваних зон знаходились в межах: (35...48) x (27...55) x (7,1...8,7) мм. 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. Герметизований натурний зразок трійника навантажували пульсуючим внутрішнім тиском води 0,2 – 7,0 МПа з частотою 4-5 циклів за хвилину. Після напрацювання 3060 циклів виникла розгерметизація натурального зразка внаслідок виникнення наскрізної тріщини втомі у дефекті зони 5 і випробування були припинені.

Експериментальні дослідження механічних властивостей металу досліджуваних зон трійника проводили відповідними випробуваннями лабораторних зразків з розмірами робочої частини Ø8x28 мм. Випробування на розтяг та малоциклову втому проводили на електрогідравлічній машині. Циклічне навантаження зразків здійснювали згідно вимог стандартів ISO 12106 – 2003 та ASTM E 606 – 80 та можливостями випробувальної машини з постійною швидкістю деформування 0,1 %/сек. (6 %/хв.) [2, 3] по симетричному трикутному осьовому (розтягу-стиску) циклу деформування з контролем амплітуди деформації (жорстке навантаження).

Металографічні дослідження мікроструктури сталі характерних зон трійника проводились на оптичному інвертованому мікроскопі «AXIOVERT 40 MAT». Вимірювання мікротвердості проведено на мікротвердомірі ПМТ-3 згідно ГОСТ 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 приведені діаграми розтягу зразків металу характерних зон трійника, а на рис. 3 графіки залежності циклічної довговічності зразків металу досліджених зон трійника від амплітуди пружно-пластичної деформації за цикл  $\varepsilon_a$ .

Із приведених діаграм розтягу слідує, що технологічні фактори, пов'язані з виготовленням трійника, суттєво впливають на характер діаграм та абсолютні значення характеристик міцності та пластичності металу в його окремих зонах. Діаграма розтягу зразка металу із зони 4 (ділянка протилежна патрубку трійника) має ознаки суттєвого зміцнення. Границя міцності металу зони 4 приблизно на 50% вища ніж для металу зони 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 3.

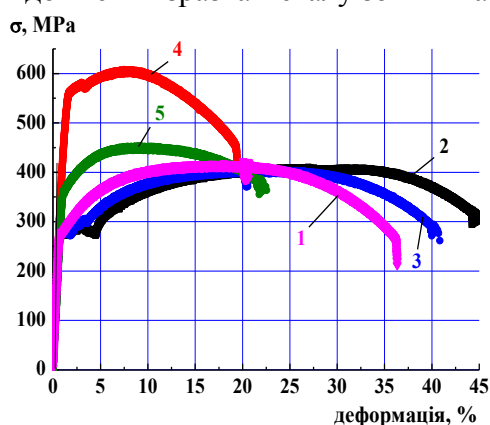


Рис. 2 Діаграми розтягу зразків металу, вирізаних із характерних зон трійника (1 – 5 зони трійника див. рис. 1).

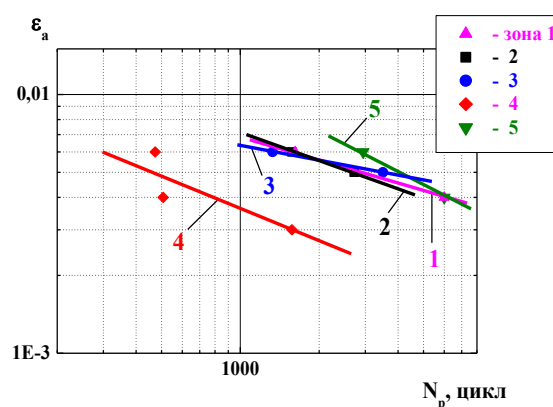


Рис. 3 Залежність циклічної довговічності зразків металу трійника від амплітуди пружно-пластичної деформації за цикл  $\varepsilon_a$

Випробування на малоциклову втому показали, що найбільшу циклічну довговічність мають зразки металу зони 5, а найнижчу – металу зони 4. У зв'язку з суттєвими

відмінностями характеру діаграм розтягу металу зон 1, 2, 3, 5 та зони 4 (див. рис. 2) циклічна довговічність зразків металу зон 1, 2, 3, 5 в 4 – 5 раз більша ніж зразків металу зони 4. Дана обставина викликана тим, що метал зони 4 суттєво зміцнений - його пластичність зменшилась приблизно в 2 рази і, як наслідок, його циклічна довговічність нижче ніж у більш пластичного металу зон 1, 2, 3, 5. 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 зміцнених сталей, а для решти досліджених зон – для циклічно стабільних сталей.

Проведені металографічні дослідження дозволили встановити що, відмінності механічних властивостей металу трійника в різних зонах, при статичному та циклічному навантаженнях, обумовлені структурною анізотропією деформації металу зони 4 (протилежної патрубку трійника) та більш високими значеннями мікротвердості в цій зоні по відношенню до зони 1 патрубка. 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>. Як в зоні 1, так і в зоні 4 спостерігаються мікротріщини, орієнтовані паралельно зовнішній поверхні досліджуваних зон, при цьому їх кількість та середня довжина переважає в січеннях зони 4 (рис. 4).

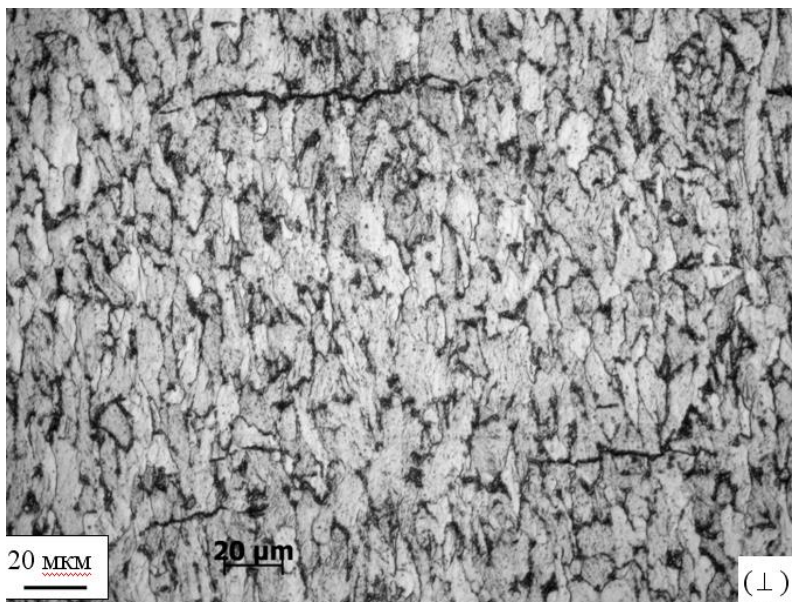


Рис. 4 Мікроструктура металу трійника в поперечному січенні зони – 4.

В процесі випробувань натурального зразка на поверхні дефекту в зоні 5 з внутрішньої сторони труби трійника зародилась багатоосередкова тріщина, яка у центральній частині дефекту проросла в наскрізну магістральну. На макрорівні наряду з фасетками квазікрихкого трансекрystalітного руйнування мають місце ділянки втомних борозенок. Встановлено, що в межах досліджуваної

глибини тріщини фактичні значення кроку борозенок складають  $(1,5 \dots 1,8) \times 10^{-3}$  мм.

На рис. 5 приведені розрахункові, згідно рівняння Лангера [4], та експериментальні криві втоми металу характерних зон трійника, з використанням яких була виконана оцінка дії модельних дефектів на довговічність натурального зразка.

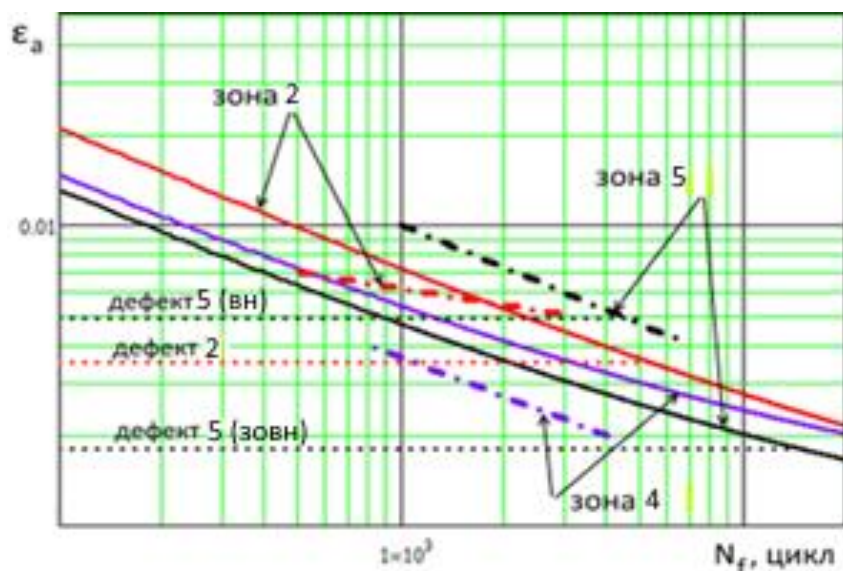


Рис. 5. Залежність циклічної довговічності зразків металу досліджених зон трійника від амплітуди пружно-пластичної деформації за цикл  $\epsilon_a$ .

Експериментальні (штрих пунктирні лінії) та розрахункові (суцільні лінії) криві втоми. Лініями у вигляді точок помічено

рівень максимальних деформацій у дефекті.

**Аналіз результатів.** Співставлення результатів показало, що розрахункові деформації перевищували експериментальні величини в дефектах 2 та 5 (всередині та зовні) зони - в 1,13, 1,36 та 1,78 рази, відповідно. Відмінності між розрахунковими та вимірними величинами являються наслідком різнотовщинності трійника.

Значення повного ККН у дефекті трійника, визначеного як добуток ККН у прямій трубі та конструктивного ККН у трійнику (МСЕ) перевищують експериментальні значення ККН у дефектах в 1,4 ... 2,2 рази. В той же час, величина повного ККН, визначеного з використанням конструктивного ККН, визначеного згідно [5], має більш близьку відповідність з експериментальними значеннями ККН – перевищення складає 1,2..1,5 рази.

У випадку розташування дефекту тих же розмірів, що і модельний, на поверхні прямої труби  $\varnothing 426 \times 12$  ККН суттєво нижче як для експериментальних так і розрахункових значень ККН в дефектах на поверхні трійника. ККН отримані експериментально у всіх випадках нижчі, чим розраховані МСЕ.

Фактичне число циклів до руйнування у дефекті натурального зразка у зоні 5 -  $N_{f_5} = 3060$  задовільно узгоджується з результатами прогнозу  $N_{f_{пр}} \approx 4400$  циклів з використанням експериментальної кривої втоми (рис. 5) – накопичене пошкодження  $d = N_{f_5}/N_{f_{пр}} \approx 0,70$ . Згідно фрактографічних досліджень встановленому кроку борозенок  $(1,5...1,8) \times 10^{-3}$  мм в межах досліджуваної глибини тріщини відповідає 2667...3125 число циклів до руйнування.

**Висновки.** Експериментально встановлено, що деформації, які виникли у дефекті, розташованому в зонах конструктивної концентрації напружень по лінії сполучення патрубку до 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.

Встановлені суттєві відмінності опору різних зон трійника статичному та циклічному навантаженню, в наслідок зміцнення та втрати при цьому вихідної пластичності однієї окремої зони трійника, які обумовили зниження в 4 ... 5 раз циклічної довговічності цієї зони відносно інших досліджених зон.

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

Число циклів до руйнування натурального зразка задовільно узгоджуються з оцінкою його довговічності, основаною на експериментальних, у тому числі фізичних та розрахункових дослідженнях НДС, та циклічних властивостях металу трійника.

### Література.

1. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
2. О. Гопкало Визначення опору малоциклового навантаженню конструкційної сталі. // Вісник Тернопільського національного технічного університету, 2014, № 3 (75) с.66-77
3. Fischmeister H.F., Danzer R., Buchmayr B., Life time prediction models. Fat. Fract. Eng. Mat. Struct. 8 (1986), 495-549.
4. Серенсен С.В. Сопротивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. М., Атомиздат, 1975, с. 192.
5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.