

10.31653/smf44.2022. 71-78

Коваленко І.В., Тютюнник С.В., Єлинський І.Е.

Національний університет «Одеська морська академія»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЦИКЛІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КРІПЛЕННЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ДОПОМІЖНИХ УСТАНОВОК**

**Постановка задачі.** У процесі досліджень які ґрунтуються на матеріалі наведеному у даній статті необхідно представити структуру моделі втомного руйнування спостережуваного об'єкта. Необхідно відстежити та обґрунтувати стадії зародження, утворення, та зростання тріщин в елементах суднових енергетичних та допоміжних конструкцій, які мають концентратори напруг.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Постійне підвищення вимог щодо якості виготовлення суднових конструкцій, виконання їх ремонтів, із застосуванням різних методів зварювання, зумовлюють необхідність урахування специфіки утворення дефектів та розробки методів виявлення закономірностей їх розвитку. Особливу роль тут грають методики прогнозу стану металоконструкцій за її експлуатації [1]. Особливо це питання виявляється актуальним для практики експлуатації суден та їх енергетичних установок характерних контрастною динамікою різноспрямованих навантажень, що випробовуються, діють у локальному обсязі металу, з утворенням макронесплошності на відстані від вершини концентратора після циклів навантаження [2].

Незважаючи на те, що в теорії та на практиці відомі різні результати досліджень відображуваних експлуатаційних навантажень на зварні з'єднання, і питання опису кінетики утворення тріщин стосовно конструкцій транспортних машин і механізмів, розкрито недостатньо [3]. Тому в цій статті розглядаються особливості втомного руйнування зварних з'єднань, що використовуються в конструкціях суднових допоміжних механізмів.

Не повністю розкриті питання підготовки зразків та їх експериментальні випробування які проводились відповідно до методики, наведеної в роботі [4].

Потребує обґрунтування окремих моментів об'єднана модель втомного руйнування включаючи моделі багато і малоциклової втоми пошкодженого матеріалу, а також умова, що визначає початковий розмір макротріщини і характеризує перехід від першої стадії втомного руйнування до другої [5].

Аналіз показав неповне узгодження складових об'єднаної моделі досягається на основі використання єдиного підходу до опису процесу накопичення пошкоджень на різних стадіях втомного руйнування, в основу якого покладено уявлення про деформаційне розпушення, зумовлене макро та мікропластичною деформацією [6].

Для вирішення питання узгодження складових об'єднаної моделі представленого вище, наведен аналіз опису впливу неоднорідності напружено-деформованого стану (НДС) на втому в концентраторах з малим радіусом кривизни у вершині, до яких відносяться дефекти зварних швів, використовується інтегральне формулювання критерію руйнування:

$$\int_{V_0} \theta(x, N) dV = \theta_*$$

де -  $V_0$  мінімальний обсяг матеріалу, в якому можливий розвиток процесу накопичення втомних ушкоджень,  $N$  - число циклів навантаження.

Протяжність уздовж осі концентратора характеризується структурно залежним параметром матеріалу значення якого надходить з випробувань на циклічну тріщиностійкість [7]. Значення параметра визначається як відстань, на якій амплітуда напруги досягає значення межі втоми при розмаху коефіцієнта інтенсивності напруг (КІН), що дорівнює пороговому значенню.

**Мета дослідження.** Основною метою дослідження є аналіз вже існуючих методик та досліджень у галузі втомного руйнування зразків та елементів обладнання.

Особливо необхідно приділити увагу втомному руйнуванню в обсягах, що перевищують після утворення макронесплошності та супроводжується одночасно розвитком двох процесів - втомаю поза зоною руйнування та зростанням тріщини в пошкодженому матеріалі.

Також необхідно дослідити критерій руйнування локального обсягу металу з утворенням макронесплошності на відстані від вершини концентратора після циклів навантаження. При виконанні досліджень необхідно визначити залежність між величиною деформаційного розпушення та роботою мікронапруг на шляху мікро- та макропластичного деформування та визначити кінетичні співвідношення.

**Викладення матеріалу дослідження.** Досліджування виконувались з урахуванням поправки Дж. Р. Ірвіна [12] на перерозподіл напруг у вершині тріщини в результаті пластичного деформування вираз для параметра набуває вигляду:

$$d = \left[ \left( \Delta K_{th} / (1-r) \sigma_{0,2} \right)^2 + \left( \Delta K_{th} / 2\sigma_r \right)^2 \right] / 2\pi$$

У даній формулі  $\Delta K_{th}$  - це порогове значення зародження та виникнення тріщини.

Результати досліджень розвитку втомного пошкодження та утворення макротріщини в концентраторі, показують, що початковий розмір макротріщини, що утворюється, узгоджується зі значенням параметрів.

Таблиця 1. Порівняння експериментальних та розрахункових значень параметрів

Матеріал	s (мм)	$\sigma_{02}$ (МПа)	d експеримент (мм)		$\sigma_r$ (МПа)		$\Delta K_{th}$ (МПа·м <sup>1/2</sup> )	d расчет (мм)
			$N_f < 10^5$	$N_f > 10^5$	r=-1	r=0		
Д16Т	6	340	0,13	0,22	126	110	5	0,12
	12		0,13	0,3				
	24		0,13	0,4				
Д16чТ1	1,85	400	0,18	0,18	120	105	6	0,17
08кп	3	280	0,25	0,25	147	134	7,8	0,26

Розвиток процесу накопичення втомних ушкоджень залежить від граничних умов для локального об'єму і, отже, контролюватиметься напругами та деформаціями на відстані від вершини концентратора. Це дозволяє записати вираз для ефективного коефіцієнта концентрації напруги у вигляді:  $k_\sigma = \Delta\sigma_d / \Delta\sigma_n$ , где  $\Delta\sigma_n$  - розмах номінальних напруг. У таблиці 1 наведено порівняння розрахункових значень параметра з даними експериментів, наведених у різних технічних літературних джерелах.

Підвищення значення параметра зі збільшенням товщини зразка та зростанням числа циклів до руйнування пояснюється переходом виду напружено-деформованого стану в підповерхневих шарах у вершині концентратора від плоского напруженого стану до плоскої деформації [9].

Порівняння розрахункових значень ефективного коефіцієнта концентрації напруги з експериментальними даними, наведеними в літературі, показує їх досить гарну згоду для сталей різних класів. Як приклад на малюнку 1 представлено порівняння експериментальних даних з розрахунковою кривою на межі втоми залежно від радіуса кругового отвору в плоских зразках із сталі 10X13.

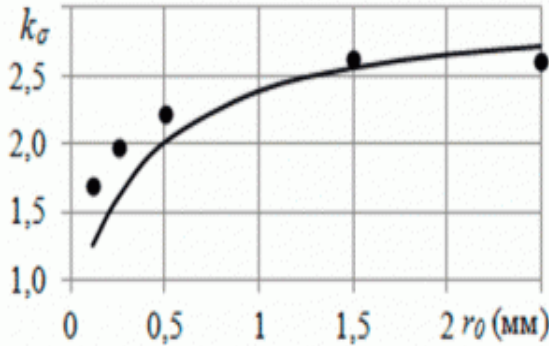


Рис. 1. - Залежність коефіцієнта концентрації напруги від радіуса отвору.

Втомне руйнування в обсягах, що перевищують, після утворення макронесплошності супроводжується одночасно розвитком двох процесів - втома поза зоною руйнування та зростання тріщини в пошкодженому матеріалі [10].

Критерій руйнування локального обсягу металу з утворенням макронесплошності на відстані від вершини концентратора після циклів навантаження записується як:  $\theta(x, N_*) = \theta_*$ . Величина деформаційного розпушення пов'язана з роботою мікронапруг на шляху мікро- та макропластичного деформування та визначається кінетичними співвідношеннями, розвиненими в працях [11].

Дискретне збільшення довжини тріщини на величину після циклів навантаження відбувається при виконанні в області вершини тріщини критерію локального руйнування, що приймає вигляд:  $\theta(\zeta_*, N_*) = \theta_*$ , где  $\theta(\zeta_*, N_*) = \theta_Y + \theta_0^P(\zeta_*) + \theta^P(\zeta_*, N_*)$ ;  $\theta_Y$  - розпушення, накопичене в результаті циклічного деформування в концентраторі напруг на першій стадії втомного руйнування, що визначається для точки з координатою  $x = l + \zeta_*$ ,  $\theta_0^P(\zeta_*)$  - розпушення у навантаженні.

На першій стадії втомного руйнування збільшення розмірів макронесплошності у вершині концентратора зі збільшенням числа циклів навантаження буде визначатися координатами точок, в яких послідовно виконується критерій втомного руйнування і характеризуватись швидкістю. Зі зростанням макронесплошності в її вершині формуватиметься НДС, характерний для макротріщини та визначаючий її швидкість зростання. Критерієм переходу від першої стадії втомного руйнування до другої, що визначає з розрахункової точки зору момент утворення макротріщини, є рівність  $\sigma_{\text{max}} = \sigma_{\text{lim}}$ . Розв'язання даного рівняння щодо відстані дає початковий розмір тріщини.

Експериментальне дослідження зародження тріщини в концентраторі напруги в умовах малоциклової втоми виконано на прямокутних зразках зі сталі Ст3, що мають у вершині крайового надрізу кругове отвори з проточкою (див. малюнок 2). Прийнята форма зразка дозволяє отримати протяжну зону циклічних пластичних деформацій, що полегшує спостереження за процесом руйнування втоми [14]. Параметри НДС у вершині концентратора розраховувалися з допомогою чисельної процедури дослідження.

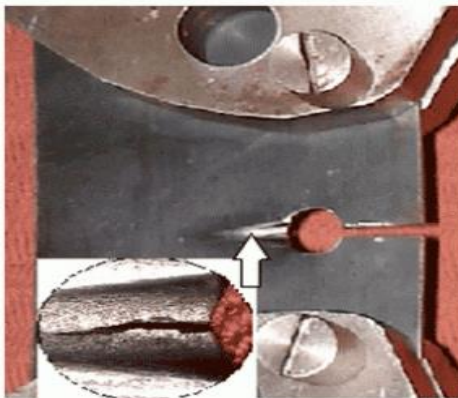


Рис. 2. – Експериментальний зразок проведення досліджень.

**Результати дослідження.** На малюнку 3 представлений характер зміни довжини тріщини, що розвивається від краю отвору, залежно від числа циклів навантаження. З отриманих даних випливає, що після уповільненого поширення руйнування втоми на відстань від вершини концентратора 1,1 мм відбувається стрибкоподібне підростання тріщини і подальше її прискорений розвиток.

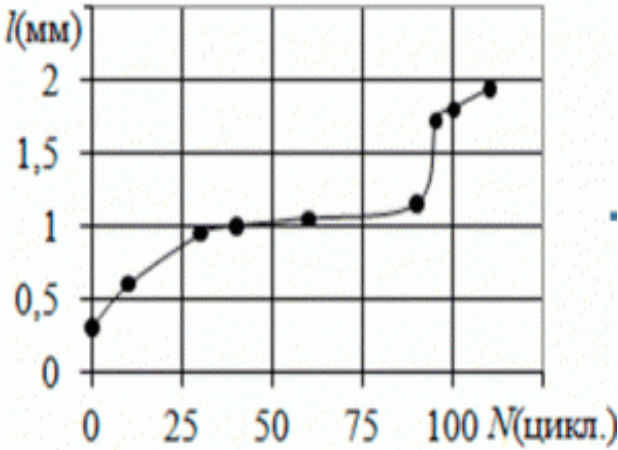


Рис.3. Графік процесу руйнування зразка.

Також за підсумками випробувань отримані дані що до збереження постійної величини розмаху деформацій. Кінематичну залежність та меншу довговічність мають зразки, випробувані з характерною асиметрією  $R=0$  (від нульового пульсуючого навантаження). Їх довговічність виявилася вдвічі нижчою порівняно з довговічністю зразків при випробуванні з  $R=-1$ , що вказує на перспективність такого підбору матеріалів використовуваних для виготовлення корпусів та елементів кріплення суднових енергетичних та допоміжних установок.

#### Висновки.

1. Отримані в результаті випробувань дані, наведені в статті, підтверджують позитивний досвід застосування сталей марок 10X13 і 09Г2С при виготовленні суднових конструкцій схильних до малоциклових навантажень.

2. Представлена і описана в цій статті підходи до визначення руйнування в концентраторах напруг описує експериментальні спостереження та закономірності, які дозволяють визначити початковий розмір втомної макротріщини, враховуючи вплив на зростання тріщини накопичених втомних ушкоджень і дають можливість виконати розрахунок ресурсу конструкції, що включають стадії утворення та зростання.

3. Застосування в якості основного матеріалу маючого структуру аустенітного, та аустенітно – феритного класу дозволить досягти максимальних значень експлуатаційної стійкості деталей працюючих

в умовах циклічних та вібраційних навантажень, а також підвищених температур.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фока А.А. Судовой механик. Т. 1. / А.А. Фока – Одесса: Феникс, 2010. –1030 с.
2. Панасюк В.В. Застосування методів механіки руйнування матеріалів для поцінування міцності зварних з'єднань / В.В. Панасюк // Автоматическая сварка. – 2008. - №11. – С.151-156 с.
3. Махненко В.И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В.И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 2006. – 618с.
4. Патон Б.Е. Новые возможности автоматической сварки в машиностроении / Б.Е.Патон, Л.Б.Медовар, В.Е.Саенко // Металлургия машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 2-5.
5. Медовар Б.И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей / Б.И. Медовар – М.: Машгиз, 1958. – 258с.
6. Chigarev V.V. Optimization of the fractional composition and performance melting powder tapes with exothermic mixture in the filler / V.V.Chigarev, A.G. Belik, D.A. Zarechenskii// Welding International. -2016. - Vol.30, No.7. – P. 557-559.
7. Белик А.Г. Регулирование массопереноса электродного металла при наплавке порошковыми лентами / А.Г.Белик // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии: Сборник научных трудов. - Краматорск, 2016. - №2(38). – С. 22-25.
8. Белик А.Г. Способы широкослойной наплавки износостойких сплавов / А.Г.Белик, Б.В. Ефременко, Я.А.Чейлях // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць. - 2016. - Вип. 33. - С. 63-68.
9. Белик А.Г. Совершенствование оборудования по производству порошковой ленты / А.Г.Белик // Захист металургійних машин від поломок: Збірник наукових праць. – Маріуполь, 2014. – с. 99-103.
10. Chigarev V.V. A mathematical model of the process of rolling flux-cored tapes/ V.V. Chigarev, A.G. Belik, E.P. Gribkov, P.A.Gavrish // Welding International. – Jun 2014. – vol.67, No.1. – P. 70-74.
11. Белик А.Г. Применение сплава сормайт для износостойкой наплавки. /А.Г.Белик // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова. – Миколаїв: НУК, 2014. - №4. – С. 89-94.

12. Firas M.F. Influence of main characteristic features of spot welding on welded connection/joint strength / Firas Al Quran, M.I. Matarneh, A.G. Belik // Journal of engineering physics and thermophysics. – 2014. – Vol.87, No.2. – P. 384-387.
13. Chigarev V.V. Flux-cored strips for surfacing / V.V. Chigarev, A.G. Belik // Welding International . - Volume 26, 2012 . – P. 975-979.
14. Касаткин Б.И. / Б.И. Касаткин В.Я. Бреднев, В.М. Волков. Методика исследования кинетики деформаций при замедленном разрушении // Автомат сварка. – 1981. - № 11. – С. 1 – 11.
15. Kovalenko I. Operation reliability evolution of the ship power pipelines with application of mathematical modeling and ultrasonic testing methods / I. Kovalenko, V. Spiridonov // The scientific heritage. - 2016. - №6 – С. 88-91.
16. Чигарев В.В. Исследование эксплуатационных свойств биметаллических сварных соединений / В. В. Чигарев, И. В. Коваленко И.В // Вестник ПГТУ. – 2011. - № 22. – С. 161-165
17. Чигарев В.В. Усовершенствование методики испытания сварных соединений из биметалла при одностороннем изгибе / В. В. Чигарев, И. В. Коваленко И.В // Захист металургійних машин від поломок.– 2010. -№ 14. – С. 99-102
18. Готальский Ю.Н. Сварные соединения разнородных сталей / Ю. Н. Готальский. – М.: Техника, 1999. – 185 с.