

*Експериментальна методика дослідження особливостей розповсюдження та зупинки тріщини в дискових зразках при термошоці / О. В. Панасенко, Є. О. Кондряков, В. В. Харченко, В. М. Жмака, І. С. Кондратенко, А. М. Мішкін, В. Е. Філатов // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2015. — Том 77. — № 1. — С. 30-35. — (Механіка та матеріалознавство).*

УДК 620.178.7

**О.В. Панасенко; Є.О. Кондряков, канд. техн. наук;  
В.В. Харченко докт. техн. наук; В.М. Жмака;  
І.С. Кондратенко; А.М. Мішкін; В.Е. Філатов**

*Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАНУ*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТА ЗУПИНКИ ТРІЩИНИ В ДИСКОВИХ ЗРАЗКАХ ПРИ ТЕРМОШОЦІ**

***Резюме.** Розроблено експериментальну методику дослідження особливостей розповсюдження та зупинки тріщини у дискових зразках в умовах термошоку. Проведено випробування та отримано дані про зміну температури на поверхні дискових зразків зі сталі 45 та 15Х2НМФА. За допомогою спеціальних розривних датчиків отримані залежності швидкості розповсюдження тріщини від часу.*

***Ключові слова:** експериментальна методика, дисковий зразок, термошок, розповсюдження та зупинка тріщини.*

**O.V. Panasenko, E.A. Kondryakov, V.V. Kharchenko, V.N. Jmaka,  
I.S. Kondratenko, A.N. Mishkin, V.E. Filatov**

## **EXPERIMENTAL METHOD OF INVESTIGATION OF CRACK PROPAGATION AND ARREST IN DISK-SHAPE SPECIMEN UNDER THERMAL SHOCK**

***Summary.** Searching of an additional durability reserves for guarantee of structural component integrity is one of the most important task of the present science. Investigations of crack propagation and arrest under thermal shock conditions are very important for service possibility justification of reactor plants during a planned lifetime. There were only few experimental investigations of crack propagation and arrest under thermal shock in the world. Thus crack propagation under thermal shock needs to be examined more.*

*Present work describes an experimental method of the disk-shape specimen testing under thermal shock conditions. Disk-shape specimen testings are relatively cheap and simple than testings of full-scale specimens and allow to obtain more specific information about crack propagation and arrest features under thermal shock. The method of a crack propagation registration using disruptive gauges was developed and approved. Experimental study of crack propagation consists of the next steps: preparing of specimen, attachment of thermocouples on the specimen surface, gluing of disruptive gauges near crack front, connection of recording system, cooling while  $-210^{\circ}\text{C}$  was reached, fast heating of an inner surface of the specimen to  $900^{\circ}\text{C}$ . The influence of a temperature gradient on crack propagation in disc-shape specimens was investigated. A temperature gradient under thermal shock was controlled with thermocouples on three different areas of the specimen surface (inner, outer and central section of the work surface). Maximal temperature gradient between two different points of specimen surface during crack propagation was near  $200^{\circ}\text{C}$ . The high-speed recording system was used to obtain crack propagation data with time resolution 0,05 microsecond. Also using of disruptive gauges allow to obtain information about crack propagation and arrest features such as place and time moment of crack initiation, place and time moment of crack arrest, instantaneous velocity of crack propagation in each moment of time. Curves of a crack propagation velocity versus time were obtained. The velocity curve is nonmonotonic function that has a significant peak at the beginning of the crack propagation with consequent decreasing of velocity value.*

***Key words:** experimental method, disc-shape specimen, thermal shock, crack propagation and arrest.*

**Постановка проблеми.** У зв'язку з пошуком додаткових резервів міцності при вирішенні питань продовження термінів експлуатації корпусів реакторів у наш час продовжують розвиватися та вдосконалюватися різні чисельні та експериментальні

методи аналізу поведінки тріщин в умовах термошоку, в тому числі при їх розповсюдженні та зупинці [1,2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні не існує нормативних документів, які регламентують проведення експериментальних досліджень розповсюдження та зупинки тріщини в умовах термошоку. Але в деяких країнах (США, Франція, Німеччина) проводяться дослідження у цьому напрямку. Наприклад, у міжнародному проекті NESK-1 [3] було проведено натурні випробування в умовах термошоку циліндра діаметром 1395 мм та товщиною стінки 175 мм з різними дефектами (у тому числі 10 тріщин). Але такі випробування є надто коштовними і не дозволяють отримати достатню кількість інформації задля оцінювання цілісності конструкції з урахуванням зупинки тріщини.

У зв'язку з цим в останній час розробляються методики проведення випробувань модельних дискових зразків з тріщиною в умовах термошоку [4,5]. Такі випробування є відносно простими та недорогими, а також дозволяють отримати додаткову інформацію про особливості розповсюдження та зупинки тріщини в умовах термошоку.

**Мета роботи** – розроблення експериментальної методики дослідження розповсюдження та зупинки тріщини під дією градієнта температур в умовах термошоку.

**Постановка завдання.** Для випробувань було обрано дисковий зразок з розмірами  $d_1=60$  мм,  $d_2=110$  мм,  $h=10$  мм. Дослідження проводилися на зразках сталі 45 та реакторної сталі 15X2НМФА. На зовнішній стороні зразка було вирощено тріщину втоми довжиною  $L_{tr}\approx 13$  мм за допомогою сучасної резонансної випробувальної машини «Testronic» виробництва швейцарської фірми «RUMUL».

Експериментальні дослідження були проведені за допомогою установки FP-100, яка оснащена системами нагрівання та охолодження, а також контролю температури у такій послідовності.

Після підготовки зразка до випробування (прикріплення термопар, наклеювання тензорезисторів, під'єднання системи реєстрації температури) зразок було покладено до холодильної камери, де він охолоджувався до температури  $T=-210^{\circ}\text{C}$ . Таку температуру було досягнуто завдяки використанню ефекту адіабатичного охолодження внаслідок миттєвого розрідження парів рідкого азоту. Детально ефект описано у роботі [6]. Після цього зразок було встановлено на теплостійку підкладнику та піддано впливу високої температури шляхом заливання у внутрішню порожнину зразка рідкого свинцю, який було перегріто до температури  $\sim 900^{\circ}\text{C}$ . Запропонована методика дозволила досягнути необхідного градієнта температур та ініціювати розповсюдження тріщини у зразках з вуглецевої сталі 45 та легованої теплостійкої сталі 15X2НМФА.

Температура поверхні зразка контролювалася термопарами та автоматичною системою реєстрації, які будуть описані в деталях нижче. Плавлення металу для отримання термошоку виконувалося у спеціальному тиглі, який знаходився у печі установки FP-100. Температура розплаву контролювалася хромель-алюмелевою термопарою.

**Результати дослідження.** За результатами експериментів було отримано дані про зміну температури на зовнішній та внутрішній поверхнях дискового зразка, а також у вершині тріщини. Ці результати було використано у розрахунках для визначення коефіцієнта теплопровідності матеріалу та умов термосилового навантаження [6].

Для реєстрації швидкості розповсюдження тріщини у зразках використовувався швидкісний аналого-цифровий перетворювач (АЦП) Adlink-9812, датчик 1-RDS22 фірми НВМ, спеціально розроблений датчик на основі тензорезисторів КФ-5 та шунтуючих резисторів. У тензорезисторах встановлено по дві перемички, які з'єднували дорожки паралельно. Схема датчика наведена на рис.1.

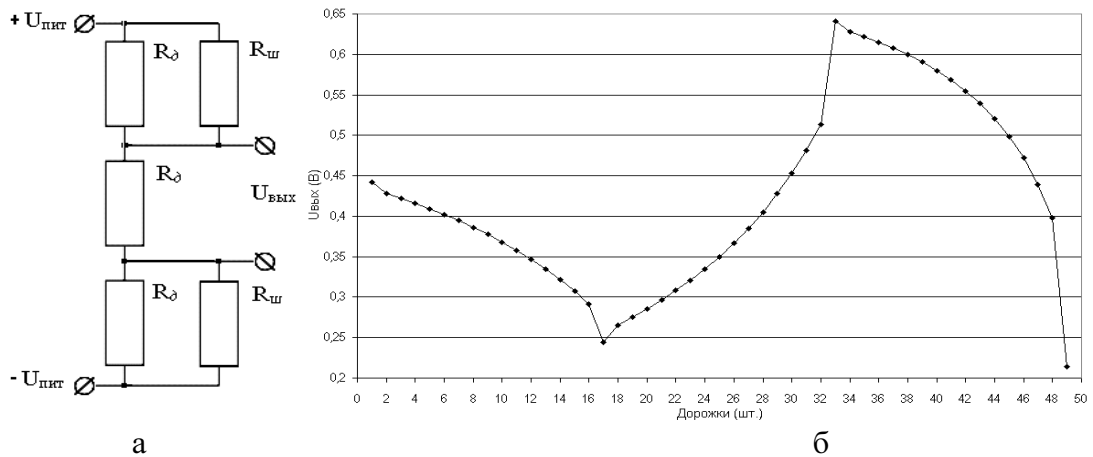


Рисунок 1. Датчик на розрив: а – схема датчика; б – розрахункова вихідна характеристика датчика

Figure 1. Gauge: a – a gauge scheme; b – a calculation output behavior of a gauge (b)

$R_d$  – повний опір доопрацьованого тензорезистора;  $R_{ш}$  – опір шунтуючого резистора;  $+U_{пит}$  и  $-U_{пит}$  – під'єднання джерела живлення;  $U_{вих}$  – вихідний сигнал датчика.

Плата АЦП Adlink-9812 встановлюється у роз'єм комп'ютерної шини PCI. Перетворювач має чотири канали аналогового вводу, може працювати в одноканальному, двоканальному та чотирьоканальному режимах. Максимальна частота перетворення АЦП при одноканальному режимі становить  $20 \times 10^6$  вимірів у секунду, що відповідає інтервалу часу між вимірами 0,05 мікросекунди. Відповідно при роботі чотирьох каналів цей час збільшується до 0,2 мікросекунд.

Датчик розкриття тріщини, опис якого наведено вище, знаходиться у місці найбільш вірогідного розкриття тріщини. Внаслідок розповсюдження тріщини провідники датчика руйнуються, і, відповідно, змінюється його опір. Зафіксувавши процес зміни опору датчика, можна визначити такі параметри розкриття тріщини:

- місце та час старту тріщини;
- місце та час зупинки тріщини;
- швидкість розкриття тріщини із дискретністю, яка відповідає часу перетворення АЦП Adlink-9812 та відстані між провідниками датчика.

На рис.2 показано зразок, обладнаний датчиками, термопарами та кабелями до датчиків розкриття тріщини.

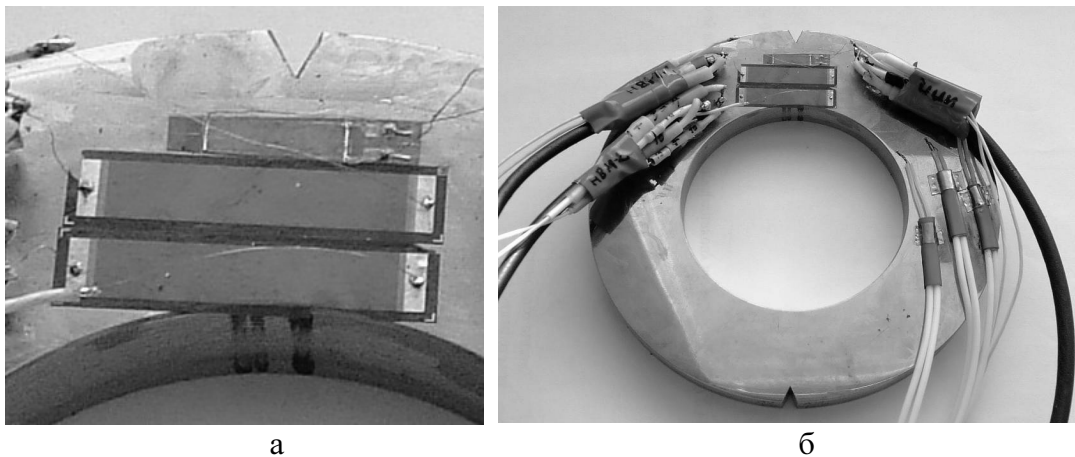
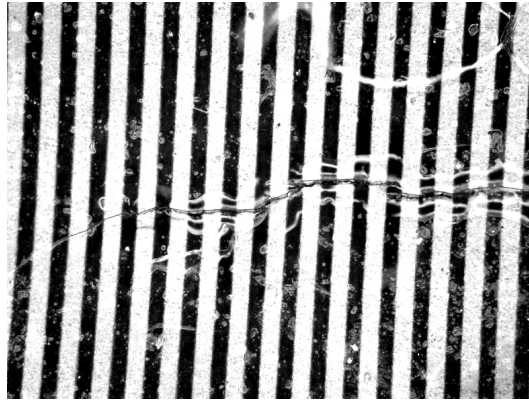


Рисунок 2. Зовнішній вигляд зразка: а – датчики розкриття тріщини; б – термопари та кабелі датчиків розкриття тріщини

**Figure 2.** A disc-shape specimen design:

a – crack opening displacement gauges; b – thermocouples and crack opening displacement gauge wires

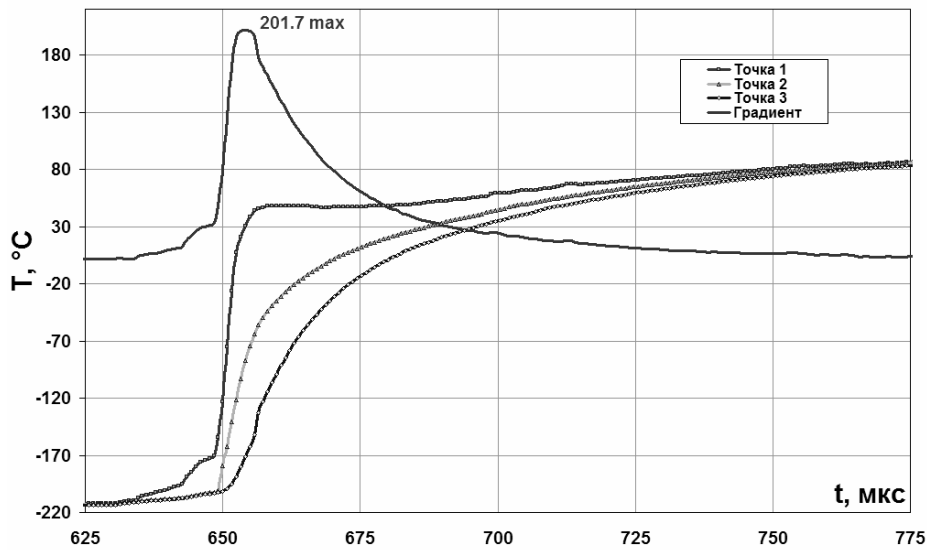
На рис.3 показано фрагмент датчика, на якому видно траєкторію розповсюдження тріщини та її зупинку.



**Рисунок 3.** Фрагмент датчика із траєкторією розповсюдження тріщини

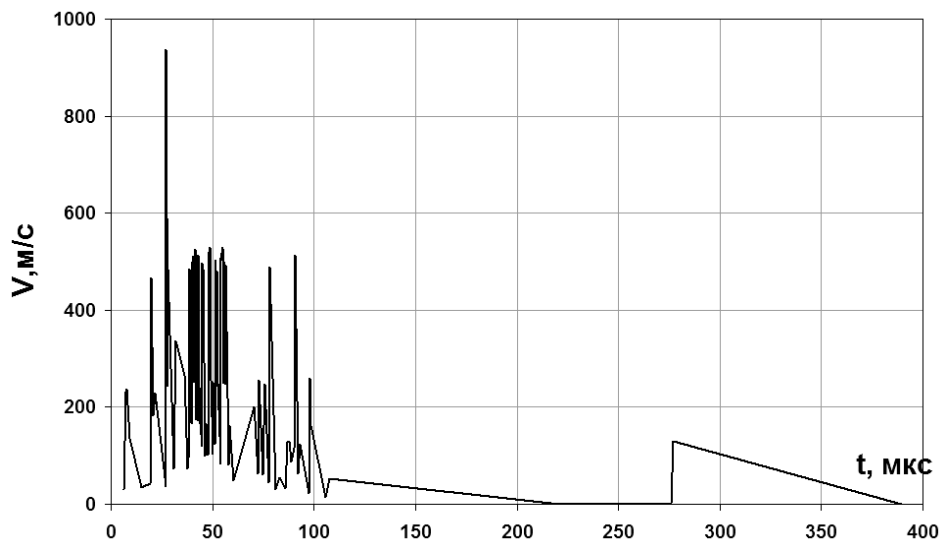
**Figure 3.** Crack propagation path on a gauge fragment

Було проведено випробування дискових зразків із тріщиною зі сталей 45 та 15X2НМФА. Отримано дані про зміну температури на поверхнях зразка у різних точках (рис.4) та швидкості розповсюдження тріщини (рис.5). Максимальний градієнт температур склав  $\Delta T=210^{\circ}\text{C}$ .



**Рисунок 4.** Зміна температури на поверхні зразка у різних зонах (точка 1 – на внутрішній поверхні, точка 2 – середина робочої поверхні, точка 3 – на зовнішній поверхні)

**Figure 4.** Curves of temperature change on specimen surface in different areas (point 1 – inner surface, point 2 – middle of work surface, point 3 – outer surface)



**Рисунок 5.** Залежність швидкості розповсюдження тріщини від часу

**Figure 5.** Dependence of the a crack propagation velocity versus time

Як можна побачити на рис.5, на початковому етапі відбувається повільне підростання тріщини (200–300 м/с), яке змінюється різким стрибком швидкості до рівня ~1000 м/с. Після цього швидкість тріщини знижується до рівня 300 м/с та практично не змінюється до моменту зупинки. Такий характер зміни швидкості розповсюдження тріщини узгоджується із результатами чисельного моделювання [6], а також із результатами подібних випробувань інших авторів [4,5].

Фрактографічний аналіз поверхонь зламів дискових зразків дозволив отримати додаткову інформацію про особливості розповсюдження та зупинки тріщини [7]. Таким чином, була розроблена методика дослідження процесів розповсюдження та зупинки тріщини у дискових зразках зі сталей 45 та 15Х2НМФА в умовах термошоку. Отримано

дані про зміну температури на поверхнях зразка та швидкості розповсюдження тріщини.

**Висновки.** Розроблено експериментальну методику дослідження процесів розповсюдження та зупинки тріщини у дискових зразках зі сталей 45 та 15Х2НМФА в умовах термошоку. Розроблено систему реєстрації швидкості розповсюдження тріщини у дисковому зразку в умовах термошоку. Отримано дані про зміну температури на поверхні зразка та швидкості розповсюдження тріщини у дисковому зразку.

**Conclusions.** An experimental method of crack propagation and arrest investigation in disk-shape specimens under thermal shock conditions was developed and approved. A registration system for crack propagation velocity estimation in disk-shape specimen was developed. A temperature change data and a crack propagation velocity data in disk-shape specimen was obtained.

#### **Список використаної літератури**

1. Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in WWER NPPs («VERLIFE») / European Commission under the Euratom Research and Training Programme on Nuclear Energy. – Version 8. – 2008. – 275 p.
2. Pressurized Thermal Shock in Nuclear Power Plants: Good Practices for Assessment / IAEA-TECDOC-1627. – Vienna. – 2010. – 229 p.
3. Hurst, R. Evaluating the NESK-1 test and the integrated approach to structural integrity assessment [Text] / R. Hurst, N. Taylor, D. McGarry // Int. J. Press. Vess. and Piping, 2001. – Vol.78. – P.213–224.
4. Prabel, B. Using the X-FEM method to model the dynamic propagation and arrest of cleavage cracks in ferritic steel [Text] / B. Prabel, S. Marie, A. Combescure // Engineering Fracture Mechanics, 2008. – Vol.75, №10. – P.2984–3009.
5. Berdin, C. Local approach to fracture for cleavage crack arrest prediction [Text] / C. Berdin, M. Hajjaj, Ph. Vompard // Engineering Fracture Mechanics, 2008. – Vol.75, №11. – P.3264–3275.
6. Микулин, Е.И. Криогенная техника [Текст] / Е.И. Микулин. – М.: Машиностроение, 1969. – 272 с.
7. Кондряков, Е.А. Численное моделирование распространения трещины в дисковом образце при термошоке [Текст] / Е.А. Кондряков // Надежность и долговечность машин и сооружений, 2009. – №32. – С.194–201.
8. Панасенко, А.В. Изучение особенностей строения излома образцов при распространении трещины в испытаниях на термошок [Текст] / А.В. Панасенко, Е.Е. Гопкало // Надежность и долговечность машин и сооружений, 2010. – №33. – С.263–272.

*Отримано 20.02.2015*