

В. Скальський

Професор, докт. техн. наук,
Фізико-механічний інститут
ім. Г. В. Карпенка НАН України,
м. Львів

Ю. Матвіїв

Доцент, канд. техн. наук

Т. Крадінова

Магістр

Луцький національний
технічний університет,
м. Луцьк

УДК: 539.375

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЗУЧОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Запропоновано ефективну методику побудови кінетичної діаграми залежності швидкості поширення тріщин низькотемпературної повзучості від коефіцієнта інтенсивності напружень. В її основі лежить явище випромінювання пружних хвиль акустичної емісії під час зародження чи розвитку руйнування конструкційних матеріалів, що дає змогу точніше визначити момент старту тріщин повзучості.

низькотемпературна повзучість, тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, акустична емісія

Явище повзучості металів викликає значну зацікавленість зі сторони експлуатаційників перш за все тому, що повзучість властива багатьом відповідальним елементам конструкцій, серед яких деталі парових турбін, трубопроводи тощо. Суттєво це явище спостерігається в тих елементах конструкцій, які працюють за високих температур – вище рівня $0,5 T_{mT}$. Тому в цьому інтервалі температур відразу ж виникла необхідність оцінювати здатність матеріалу чинити опір повзучості і експериментальні дослідження отримали широкий розвиток.

Дещо гірше досліджувалась низькотемпературна повзучість, оскільки ще донедавна вважалося, що вона розвивається слабко, а тому не несе суттєвої загрози передчасному виходу з експлуатації елементів конструкцій. Однак за наявності тріщин, котрі перебувають у стані передруйнування, повзучість може призвести до порушення їхнього гранично-рівноважного стану і непередбачуваного виходу їх з експлуатації.

Стандартні випробування на високотемпературну повзучість вимагають використання гладких циліндричних зразків, які нагрівають, а відтак, і навантажують, часто з використанням важільних пристроїв. На сьогодні відома ціла низка таких механізмів, обладнаних відпо-

відними нагрівачами. Матеріали, які схильні у нормальних умовах випробувань деформуватись за типом в'язкого трансхристалітного зсуву, за високих температур можуть руйнуватись по межах зерен. Таким чином, за низькотемпературної повзучості межа зерна слугує ефективним бар'єром для рухомих дислокацій.

У царині досліджень низькотемпературної повзучості проведено обмаль досліджень і зумовлено це, перш за все, відсутністю ефективних методик виявлення початку руйнування. Тому надзвичайно актуальними є розробки таких методик, особливо із застосуванням нових фізичних явищ та досягнень електроніки, схемота виміральної техніки.

Стан проблеми. На процес поширення тріщин впливають різні фактори, зокрема, такі як напруження, температура, час навантаження, структура матеріалу тощо. Під час довготривалого статичного навантаження руйнування металів проходить (за відсутності агресивних середовищ та інших фізико-хімічних чинників) за механізмами низькотемпературної або високотемпературної повзучості [1]. Для випадку поширення тріщин низькотемпературної повзучості в полімерах та інших в'язкопружних тілах у працях А.О. Камінського [2, 3] на базі

відомої δ_C – моделі і принципу Вольтера в лінійній теорії в'язкопружності створені відповідні теоретичні засади. Однак, випадки поширення в металевих пружно-пластичних матеріалах тріщин повзучості не можуть бути описані в рамках такої теорії через відмінності механізмів сповільненого руйнування. Окрім того, розвиток теоретичних підходів гальмувався відсутністю експериментальних даних для перевірки їхніх основних положень. Особливо недостатньо досліджені задачі про довготривале статичне навантаження елементів конструкцій з тріщинами, які є важливими для інженерної практики, надто у випадку конструкцій довготривалої експлуатації. Втрата їхньої міцності відбувається шляхом поширення тріщин повзучості. Для бездефектних матеріалів вже отримано деякі результати досліджень повзучості матеріалів, за якими прогнозували довготривалу міцність і довговічність елементів конструкцій [4 – 6].

Потрібно зазначити, що у працях [7, 8] показано, що за докритичного навантаження зразків з пластичних матеріалів з наявними у них тріщинами, останні підостають за короткий час на деяку довжину. Це призводить до певних неточностей у визначенні характеристик тріщиностійкості матеріалів і свідчить про те, що за сповільненого або довготривалого статичного навантаження таке підростання буде істотним і спричинятиме руйнування. Основним механізмом його є низькотемпературна повзучість [6, 9], яка зумовлює сповільнене руйнування і докритичне поширення тріщини за навантажень значно менших від критичних.

Мета досліджень – створення експериментальної методики визначення швидкості росту тріщин низькотемпературної повзучості на всіх ділянках діаграми методом акустичної емісії.

Методологія оцінювання швидкості росту тріщин низькотемпературної повзучості. Для експериментального визначення порогового значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) у робочих середовищах ефективно використовують метод акустичної емісії [10]. Саме він дозволяє визначати ранні стадії розвитку тріщини у випадку, коли зареєструвати її поширення по боковій поверхні зразка неможливо. Аналогічний випадок і під час низькотемпературної повзучості, коли тріщиноутворення відбувається, а макропоказники зміни стану зразка відсутні. Цей методологічний аспект і стримує тривалий час розвиток експериментальних досліджень у цій царині механіки руйнування. Таким чином, виникла необхідність у розробленні нових сучасних методик, які дозволили б виявляти латентні періоди зародження і розвитку тріщин повзучості у конструкційних матеріалах, що дозволило б у кінцевому результаті успішно прогнозувати залишковий ресурс елементів конструкцій і запобігати передчасному їх руйнуванню.

Вибір типу зразків для випробувань. Розміри зразка і спосіб його виготовлення вибирають виходячи з поставлених задач експерименту: виду випробувань, способу навантаження, типу досліджуваного матеріалу і його міцнісних властивостей, конструктивних особливостей навантажувальних пристроїв тощо. Тому єдиних універсальних регламентованих способів виготовлення зразків і підготовки їх до експериментальних

досліджень для побудови кінетичних діаграм розвитку тріщин низькотемпературної повзучості не існує. Однак, як і у випадку випробувань на статичну і циклічну тріщиностійкість, аналогічні зразки матеріалів з наведеними тріщинами можна брати й для випробувань на низькотемпературну повзучість. Тоді після вибору типу зразка його механічно обробляють до необхідних розмірів, форми та чистоти поверхні в термообробленому стані. Якщо така обробка утруднена, зразок попередньо виготовляють з допусками не менше 0,5 мм, які надалі знімаються шліфуванням. Необхідно підкреслити, що окремим важливим моментом у підготовці зразків до АЕ-досліджень є те, що особливо ретельно має бути підготовлене місце для встановлення первинних перетворювачів сигналів АЕ (ПАЕ). Найчастіше його готують механічним або електрополіруванням після операції шліфування поверхонь зразка.

Важливий чинник виключення неінформативних сигналів АЕ правильне закріплення зразка в захватах навантажувального пристрою і забезпечення відсутності пластичного течіння матеріалу зразка в місцях контакту з опорами і в захваті чи під індентором. Усі ці вимоги дотримано нами, виходячи з особливостей об'єкта досліджень та наявної експериментальної бази АЕ-досліджень.

Методичні аспекти підготовки та проведення АЕ-досліджень. Залежно від мети досліджень, наявної апаратури АЕ та способу випробувань зразків на низькотемпературну повзучість потрібно: вибрати амплітудно-частотні характеристики ПАЕ; встановити робочу смугу приладу АЕ, яка була б поза смугою частот шумів навантажувальних пристроїв; встановити рівень дискримінації та коефіцієнт підсилення АЕ-тракту; налаштувати найвищу чутливість вимірювального каналу імітаторами АЕ.

У лабораторних умовах випробувань для за безпечення надійного акустичного контакту між поверхнями перетворювача та досліджуваного матеріалом, ефективного вибору робочої смуги частот, рівня дискримінації і коефіцієнта підсилення вимірювального каналу використовують ефект Кайзера (ЕК) за повторно-статичного навантаження зразка [11]. Тобто зашунтований зразок навантажують до величин, що перевищують критичне навантаження в експерименті, а потім розвантажують і знову навантажують. Під час повторного навантаження підбирають нижню частоту робочої смуги частот, піднімають поріг дискримінації і оптимізують коефіцієнт підсилення вимірювального тракту.

Під час АЕ-досліджень, особливо у виробничих умовах, інколи неможливо повністю відмежуватися від фонових завад: механічних, електричних чи електромагнітних. Такі завади можуть становити частину зареєстрованих АЕ-даних і суттєво ускладнювати їх розшифрування та інтерпретацію, а деколи й взагалі призвести до хибних висновків. Тоді вживають додаткових заходів захисту АЕ-тракту. З цієї метою нами розроблено новий ефективний метод АЕ-контролю за тріщинами з виключенням сигналів АЕ від механічних, електричних та електромагнітних завад [12]. Спочатку виявляють взаємовіддалені зони зразка і суміжного з ним обладнання, де очікуються найбільші значення параметрів сигналів АЕ відповідно

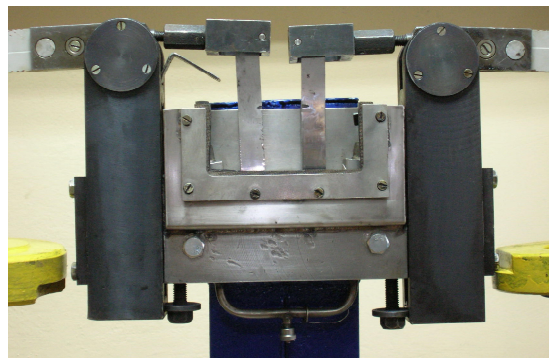
від тріщини та від завад, а різниця між часом приходження сигналів АЕ від завади менша за тривалість події АЕ. Там встановлюють ПАЕ з приблизно однаковими амплітудно-частотними характеристиками, з яких сигнали поступають на два паралельні рівночутливі канали. Режими відбору сигналів АЕ підбирають так, щоб каналами пройшли майже однакові за амплітудами сигнали АЕ (або з більшою на другому каналі, ніж на першому, оскільки його перетворювач ближче до зони завад). Під час розвитку руйнування чи росту тріщини, коли немає завад, сигнал АЕ пройде першим каналом і буде відсутнім на другому (або набагато меншим, ніж на першому), що дає змогу виділити його на акустограмі. Таким чином, параметри сигналів АЕ від росту тріщини отримуємо, виключаючи такі, що зареєстровані одночасно всіма перетворювачами АЕ з практично однаковими амплітудами або з більшими із зони дії завад (другий канал реєстрації).

Отож суть методичного підходу застосування ЕК у наших випробуваннях полягав у тому, що під час навантаження зразка реєструвати сигнали АЕ лише із зони розвитку макротріщини

Використовуючи цей факт, для налаштування АЕ-засобів від шумів спочатку встановлювали зразок у відповідне пристосування і створювали індентором у місці накладання тяги напруження, які на 20 - 30% вищі від максимальних, що виникатимуть під час випробувань.



а)



б)

Рис. 1. Загальний вигляд установки (а) та вузла навантаження зразків (б)

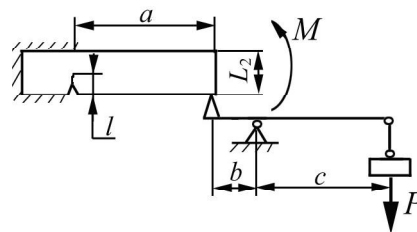


Рис. 2. Структурна схема довготривалого навантаження зразка з тріщиною за допомогою розробленої навантажувальної установки

Таким чином, у часовому інтервалі випробувань синхронно неперервно записували покази інформаційних вимірювальних АЕ-каналів, за якими встановлювали момент початку розвитку тріщин низькотемпературної повзучості. Далі на певній часовій базі реєстрували оптичним методом величину її підростання, а відтак визначали швидкість поширення.

Навантажувальна установка. Для проведення експериментальних випробувань була розроблена спеціальна навантажувальна установка, показана на рис. 1. Схема навантаження, яка у ній реалізована, подана на рис. 2.

В якості силозбуджувача використовували важіль першого роду з плечами b і c (див. рис. 2). До плеча c прикладали відповідний тягар для створення заданої величини сили P , яка на защемленому зразку висотою L_2 створювала через плече b важеля необхідний КІН K_1 біля вершини попередньо виведеної втомної тріщини довжиною l . Відстань від точки прикладання моменту M (плече a) сили до тріщини регулювали у залежності від умов експерименту, в яких передбачали зміну плеч a та c (див. рис. 1) і величини зусилля P .

Конструкційно установка була виконана таким, що давала змогу одночасно випробовувати чотири зразки на низькотемпературну повзучість за різних їх навантажень моментом M .

Результати випробувань та їх інтерпретування. На рис. 3 наведено структурну схему випробувань на низькотемпературну повзучість з використанням портативної багатоканальної вимірювальної акустико-емісійної системи SKOP-8 [13]. Використовували чотири канали для вимірювання АЕ і один канал для реєстрації фонових завад (на схемі верхній канал 2).

Момент появи сигналів АЕ, зареєстрованих вимірювальними каналами, слугував моментом відліку часу розвитку тріщин низькотемпературної повзучості у кожному з чотирьох зразків, які одночасно випробовували за різних значень КІН. Відтак на однаковому часовому інтервалі, який для кожного зі зразків мав свій момент початку відліку, пророщували тріщину на довжину Δl_i .

Вимірявши довжину проростання тріщини Δl_i на однаковій часовій Δt_i базі для кожного зразка, встановлювали як припорогову швидкість поширення тріщини низькотемпературної повзучості за відповідного КІН $K_{i,thc}$ (перша ділянка діаграми розвитку тріщин низькотемпературної повзучості) так і швидкості її росту V_i на інших ділянках діаграми за відповідних фіксованих початкових значень КІН:

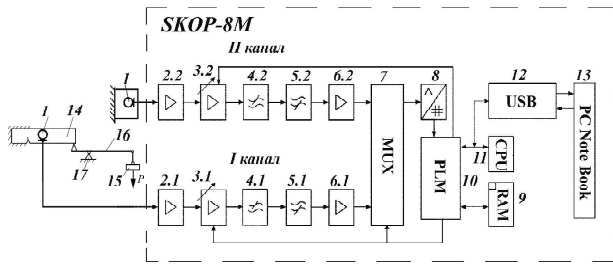
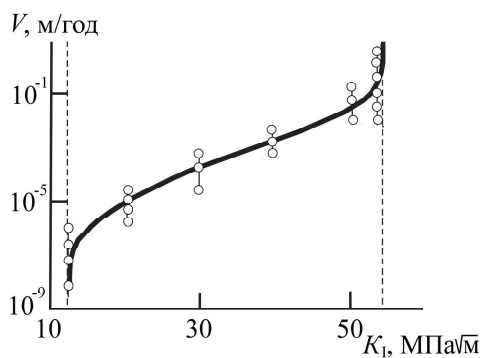
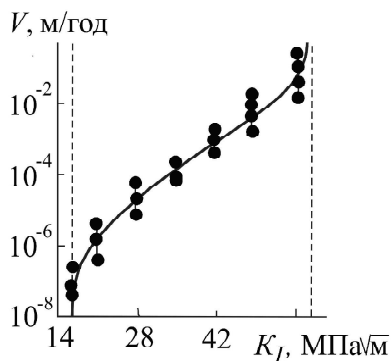


Рис. 3. Структурна схема експериментальних досліджень: 1 – ПАЕ; 2 – попередній підсилювач; 3 – підсилювач з програмованим коефіцієнтом підсилення; 4 – фільтр низьких частот; 5 – фільтр високих частот; 6 – масштабувальний підсилювач; 7 – комутатор; 8 – аналого-цифровий перетворювач; 9 – оперативно-запам'ятовуючий пристрій; 10 – програмована логічна інтегральна схема; 11 – сигнальний процесор; 12 – приймач-передавач USB; 13 – персональний комп'ютер; 14 – досліджуваний зразок; 15 – тягар; 16 – важіль; 17 – опора



а)



б)

Рис. 4. Діаграма залежності швидкості поширення тріщини низькотемпературної повзучості V від K_I для арматурної сталі А1000 (а) та сталі 10ХСНД (б) за кімнатної температури випробувань

$$V_i(K_{II}) = \Delta l_i / \Delta t_i. \quad (1)$$

Для розрахунку і встановлення на кожному зі зразків необхідної величини КІН K_I виходили зі схеми навантаження (див. рис. 2) з використанням залежності [4]:

$$K_I = 6F_1 M \sqrt{\pi} [t(L_2 - l)^{3/2}]^{-1}, \quad (2)$$

де F_1 – відома функція від співвідношення l/L_2 , значення якої протабульовано у [4]; t – товщина зразка. Зусилля для створення моменту M для кожного конкретного зразка визначали з умови рівноваги важеля під дією сили P . Таким чином, задавши значення КІН K_I на тріщині кожного зразка і маючи геометрію навантаження зразків, показану на рис. 2, знаходили для них з наведеної вище залежності величину P за отриманими значеннями M . У результаті проведених розрахунків виставляли на кожному з чотирьох важелів необхідне навантаження і включали вимірювальні АЕ-канали. За даними експериментальних випробувань з використанням методу АЕ отримували значення швидкостей поширення тріщин низькотемпературної повзучості на всіх ділянках кінетичної діаграми розвитку тріщин низькотемпературної повзучості (рис. 4).

Як впливає з рис. 4 найвищий розкид даних отримано у припорогових областях. Це пов'язано з методологічними аспектами вимірювань, а саме: з налаштуванням вимірювальних АЕ-каналів на високу чутливість під час визначення K_{Ithc} і лавиноподібним спонтанним розвитком руйнування у кінцевій фазі випробувань.

Висновки. Для побудови кінетичних діаграм розвитку тріщин низькотемпературної повзучості необхідно якомога точніше виявляти момент початку розвитку руйнування у конструкційних матеріалах, оскільки воно розпочинається без змін макропоказників стану матеріалу. Ефективним методом для визначення цього параметра слугує явище акустичної емісії, яке дозволяє фіксувати стадії дислокаційних механізмів мікротріщиноутворення.

Отримані за допомогою АЕ-контролю дані про кінетику розвитку тріщин низькотемпературної повзучості дозволяють точніше розрахувати залишковий ресурс тіл з тріщинами, які працюють в умовах довготривалого експлуатування під дією статичних навантажень.

Література

1. Витцель В.И. Влияние температуры на разрушение / В.И. Витцель, Н.Р. Эдсит // в кн.: Разрушение. – Т.4. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 68 – 104.
2. Каминский А.А. Механика разрушения вязкоупругих тел / Каминский А.А. – К.: Наукова думка, 1980. – 157 с.
3. Kaminsky A.A. Subcritical Crack Growth in Polymer Composite Materials under Creep / A.A. Kaminsky // Advances in fracture resistance and structural integrity: Selected papers from the 8th International Conference on Fracture (8-14 June 1993), Kijev, Ukraine – Pergamon, 1994. – P. 513–520.
4. Ленин Г.Ф. Ползучесть металлов и критерии жаропрочности / Ленин Г.Ф. – М.: Металлургия, 1976. – 375 с.
5. Тайра С. Теория высокотемпературной прочности материалов / С. Тайра, Р. Отани. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с.
6. Garofalo F. Fundamentals of creep and creep-rupture in metals / Garofalo F. – New York-London: Mac Millan Company, 1970. – 343 p.
7. Механика разрушения и прочность материалов. В 4 т. – К.: Наук. думка, 1988. – 1990. – Т. 3. Ковчик С.Е., Морозов Е.М. Характеристики кратковременной

трещиностойкости материалов и методы их определения. –1988. – 436 с.

8. *Панасюк В.В.* Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В.В. Панасюк, О.Е. Андрейків, С.Е. Ковчик – К.: Наук. думка, 1977. – 488 с

9. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. – Т.2. – М.: Мир. – 1969. – 863 с.

10. *Патент України №82808.* МПК (2008): G01N29/14; Спосіб експресовірки водневої та корозійної тріщиностійкості матеріалів / Скальський В.Р., Назарчук З.Т., Андрейків О.Є., Селівончик Т.В. Опубл. 12.05.2008 р. Бюл. №9.

11. *Назарчук З.Т., Скальський В.Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Науково-технічний посібник. У 3 т. Т.2. Методологія акустико-емісійного діагностування. – К.: Наук. думка, 2009. – 263 с.

12. *Патент України №2914.* МПК: G01N29/14. Спосіб контролю росту тріщин у зразках матеріалів / Андрейків О.Є., Скальський В.Р., Лисак М.В. Опубл. 26.12.94р. Бюл.5-1.

13. *Назарчук З.Т., Скальський В.Р.* Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Науково-технічний посібник. У 3 т. Т.3. Засоби та застосування методу акустичної емісії. – К.: Наук. думка, 2009. – 327 с.

14. *Саврук М.П.* Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / В кн.: Механика разрушения и прочность материалов. Справоч. пособ. в 4 т. – т. 2. – К.: Наук. думка, 1988. – 620 с.

Отримана 26.08.11

V. Skalskyj, Yu. Matvijiv, T. Kradinova
A method for assessment of material creep

An effective method has been proposed for constructing a kinetic diagram that reflects the dependency of crack propagation rate on stress intensity factor under low-temperature creep condition. This method is based on the phenomenon of radiation of elastic waves of acoustic emission during initiation or propagation of fracture in structural materials, allowing more accurate determination of the moment of creep crack initiation.

Інформація

8-th EUROPEAN SOLID MECHANICS CONFERENCE

9 July 2012 – 13 July 2012

Graz, Austria

The first European Solid Mechanics Conference (ESMC) was held in Munich in 1991. This very successful conference initiated a tri-annual series with subsequent conferences held in Genova, Stockholm, Metz, Thessaloniki, Budapest and Lisbon. The 8th European Solid Mechanics Conference will take place at the Grazer Congress, under the auspices of EUROMECH, during July 9-13, 2012. The aim of the ESMC is to provide a forum for scientists and engineers to exchange ideas on the current state-of-the-art in the mechanics of solids, on new concepts and ideas and to identify important new directions for research.

We invite you to participate in this conference and to contribute to any topic of your scientific interest. The General (contributed) Sessions for this conference have been organized into seven main areas:

Continuum Mechanics
Material Mechanics
Computational Mechanics
Multifield Problems
Structural Mechanics
Experimental Mechanics
Dynamics

In addition, Mini-Symposia will be organized in a range of specialized topics.

Two joint **EUROMECH-ECCOMAS** mini-symposia on

“Science and Technology of Composites Manufacturing Processes” and

“Virtual Testing of Composites”

will be organized during the Conference.

Contact:

Prof. G.A. Holzapfel

E-mail: holzapfel@tugraz.at