

**Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, А. С. ХОРОШУН, А. В. СЕНЬКО, О. А. ТАТАРИНОВА,
Г. О. АНИЩЕНКО**

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЗУЧОСТІ ТА КОРОЗІЙНОГО РОЗТРІСКУВАННЯ ТРУБ

Статтю присвячено опису методу спільного аналізу деформування та руйнування конструктивних елементів, що знаходяться в умовах високотемпературної повзучості, пов'язаного з нею накопичення прихованих пошкоджень, та в яких деякі поверхні піддано впливу агресивних середовищ. Крайова задача розв'язується з використанням методу скінченних елементів, для початкової задачі використано різницевий метод інтегрування за часом. Для аналізу корозійного розтріскування внутрішньої поверхні труби використано підхід, що полягає у виключенні з розрахункової моделі «зруйнованих» скінченних елементів, тобто тих, в яких параметр пошкоджуваності сягнув свого критичного значення, та переформулювання крайової задачі для моделі з новою геометрією та збереженими початковими умовами для компонентів напружено-деформованого стану та параметру пошкоджуваності у решті скінченних елементів. Для моделювання накопичення прихованої пошкоджуваності внаслідок повзучості та корозії використано підхід з врахуванням внесків приростів відповідних процесів на кожному кроці за часом. Пошкоджуваність внаслідок корозії моделюється автомодельним еволюційним рівнянням з врахуванням спеціально визначеного еквівалентного напруження на поверхні тіла. Як приклад використання методу чисельного моделювання розглянуто процес повзучості з прихованим руйнуванням матеріалу та подальше корозійне розтріскування у товстій трубі. Проаналізовано процес зростання пошкоджень у її матеріалі, оцінено співвідношення між швидкістю накопичення пошкоджень внаслідок повзучості та корозійного розтріскування на поверхні. Розроблений підхід та скінченноелементний метод розрахунку пропонується надалі застосувати для аналізу деформування та корозійного розтріскування елементів конструкцій складної геометрії, які використовуються у енергетичній та атомній промисловості.

Ключові слова: повзучість, пошкоджуваність, корозійне розтріскування, моделювання, метод скінченних елементів, товста труба.

D. BRESLAVSKY, A. KHOROSHUN, A. SENKO, O. TATARINOVA, G. ANISHCHENKO

MODELING OF CREEP AND CORROSION CRACKING PROCESSES IN TUBES

The paper is devoted to the description of the method of joint analysis of deformation and fracture of structural elements that are in conditions of high-temperature creep, the accumulation of hidden damage associated with it, and in which some surfaces are exposed to aggressive environments. The boundary value problem is solved using the finite element method, for the initial one the finite difference method of integration over time was used. For the analysis of corrosion cracking of the inner surface of the tube, an approach was used that consists in excluding from the calculation model the “destroyed” finite elements, i.e. those in which the damage parameter has reached its critical value, and reformulating the boundary value problem for the model with a new geometry and preserved initial conditions for the components of the stress-strain state and the damage parameter in the remained finite elements. To simulate the accumulation of hidden damage due to creep and corrosion, an approach was used that takes into account the contributions of the increments of the corresponding processes at each time step. Corrosion damage is modeled by an auto-model evolution equation taking into account a specially defined equivalent stress on the surface of the body. As an example of using the numerical modeling method, the creep process with material damage accumulation and subsequent corrosion cracking in a thick tube is considered. The process of damage growth in its material is analyzed, the ratio between the rates of damage accumulation due to creep and corrosion cracking on the surface is estimated. The developed approach and finite element calculation method are proposed to be further applied to the analysis of deformation and corrosion cracking of structural elements of complex geometry used in the power and nuclear engineering.

Key words: creep, damage, stress corrosion cracking, modeling, finite element method, thick tube.

Список літератури

1. Jones R. H. Mechanisms of stress-corrosion cracking. / R. H. Jones – Stress-Corrosion Cracking: Materials Performance and Evaluation, 2017. – р. 1-41. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.sccmpe2.t55090001>
2. Андрейків О. С. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. / О. С. Андрейків, О. В. Гембара – К.: Наук. думка, 2008. – 344 с.
3. Kofstad P. High temperature corrosion / P. Kofstad – London and New York, Elsevier Applied Science, 1988. – 568 p.
4. Marcus P. Analytical methods in corrosion science and engineering. / P. Marcus, F. B. Mansfeld – CRC press, 2005. – 776 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028331>
5. Sequeira C. A. C. High temperature corrosion: fundamentals and engineering. / C. A. C. Sequeira – John Wiley & Sons, 2019. – 629 p. <https://doi.org/10.1002/9781119474371>
6. Aldellaa I. Effect of creep on corrosion-induced cracking / I. Aldellaa et al. // Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – Т. 264. – P. 108310. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.03135>
7. Морачковский О. К. Континуальная модель роста трещин коррозионного растрескивания для расчета ресурса конструкций / О. К. Морачковский, Ю. В. Ромашов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 46, № 2. – С. 111-116.
8. Морачковский О. К. Прогнозирование коррозионного растрескивания конструкций при высокотемпературной ползучести / О. К. Морачковский, Ю. В. Ромашов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2010. – № 5. – С. 43-47.
9. Wang X. Y. Numerical investigation of creep crack growth behavior of UNS N10003 alloy based on the creep damage model / X. Y. Wang et al. // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2022. – Т. 200. – P. 104838. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104838>
10. Jezequel T. Stress corrosion crack initiation of Zircaloy-4 cladding tubes in an iodine vapor environment during creep, relaxation, and constant strain rate tests / T. Jezequel et al. // Journal of Nuclear Materials. – 2018. – Т. 499. – P. 641-651. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.07.014>

11. Hembara O. V. Modeling of the deformation of structural elements under the conditions of creep, corrosion cracking, and hydrogenation / O. V. Hembara, O. Y. Chepil // *Materials Science*. – 2022. – Т. 57. – №. 4. – P. 557-561. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00578-x>
12. Mohamad B. A. Failure analysis of gas turbine blade using finite element analysis / B. A. Mohamad, A. Abdelhussien // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. – 2016. – Т. 7. – №. 3. – P. 299-305.
13. Jiang X. Exploring the creep and oxidation behaviors of four types of FeCrAl alloys through small punch test at 600° C: experiments and simulations / X. Jiang et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Т. 27. – P. 733-756. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.301>
14. Robin R. Probabilistic finite element analysis of a heavy duty radiator under internal pressure loading / R. Robin, V. Hariram, M. Subramanian // *Journal of Engineering Science and Technology*. – 2017. – Т. 12. – №. 9. – P. 2438-2452.
15. Liu C. A review of the application of finite element method (FEM) to localized corrosion modeling / C. Liu, R. G. Kelly // *Corrosion*. – 2019. – Т. 75. – №. 11. – P. 1285-1299.
16. Бреславський Д.В. Деформування та довготривала міцність конструктивних елементів ядерних реакторів. / Д.В. Бреславський. – Харків, Друкарня Мадрид, 2020. – 249 с.
17. А.с. 82758. Комп'ютерна програма «Розв'язання двовимірних задач повзучості, пошкоджуваності та розповсюдження тріщин» (FEM creep-damage-fracture). Бреславський Д.В., Сенько А.В., Татарінова О.А. Дата реєстрації 12.11.2018.
8. Morachkovsky O. K., Romashov Yu. V. Prognozyrovanye korrozyonnogo rastreskyvaniya konstrukcyj pry vysokotemperaturnoj polzuchesty [Prediction of stress corrosion cracking of structures under high-temperature creep]. *Fizyko-khimichna mexanika materialiv*. [Physicochemical mechanics of materials]. 2010. № 5. P. 43-47.
9. Wang X. Y. et al. Numerical investigation of creep crack growth behavior of UNS N10003 alloy based on the creep damage model. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022, T. 200, P. 104838. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104838>
10. Jezequel T. et al. Stress corrosion crack initiation of Zircaloy-4 cladding tubes in an iodine vapor environment during creep, relaxation, and constant strain rate tests. *Journal of Nuclear Materials*, 2018, T. 499, p. 641-651. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.07.014>
11. Hembara O. V., Chepil O. Y. Modeling of the deformation of structural elements under the conditions of creep, corrosion cracking, and hydrogenation. *Materials Science*. 2022, T. 57, №. 4. P. 557-561. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00578-x>
12. Mohamad B. A., Abdelhussien A. Failure analysis of gas turbine blade using finite element analysis. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*. 2016, T. 7, №. 3, P. 299-305.
13. Jiang X. et al. Exploring the creep and oxidation behaviors of four types of FeCrAl alloys through small punch test at 600° C: experiments and simulations. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023, T. 27, P. 733-756. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.301>
14. Robin R., Hariram V., Subramanian M. Probabilistic finite element analysis of a heavy duty radiator under internal pressure loading. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2017, T. 12, №. 9, P. 2438-2452.
15. Liu C., Kelly R. G. A review of the application of finite element method (FEM) to localized corrosion modeling. *Corrosion*. 2019, T. 75, №. 11, P. 1285-1299.
16. Breslavsky, D. V. *Deformuvannya ta Dovhotryvala Mitsnist Konstruktyvnykh Elementiv Yadernykh Reaktoriv* [Deformation and Long-Term Strength of Structural Elements of Nuclear Reactors]. Drukarnia Madryd, 2020. 249 p.
17. C.C. 82758. Computer program Rozvyazannya dvovymirnykh zadach povzuchosti, poshkodzhuvanosti ta rozповсюдження trishhyn (FEM creep-damage-fracture). [Solution of two-dimensional problems of creep, damage and cracks (FEM creep-damage-fracture)]. Breslavsky D.V., Senko A.V., Tatarinova O.A. Registration date 12.11.2018.

References (transliterated)

• Надійшла (received) 16.06.2025

Бреславський Дмитро Васильович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Dmytro.Breslavsky@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3792-5504>

Breslavsky Dmytro – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Modeling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057)-707-64-54; e-mail: Dmytro.Breslavsky@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3792-5504>

Хорошун Андрій Сергійович – аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: a.s.khoroshun@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4369-137X>

Khoroshun Andriy – PhD student of the Department of Computer Modeling of Processes and Systems; National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) 707 64 54; e-mail: a.s.khoroshun@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4369-137X>

Сенько Альона Володимирівна – доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Alyona.Senko@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9961-7419>

Senko Alyona – PhD, Senior lecturer of the Department of Computer Modelling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057)-707-64-54; e-mail: Alyona.Senko@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9961-7419>

Татарінова Оксана Андріївна – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Oksana.Tatarinova@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3090-8469>

Tatarinova Oksana – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Computer Modeling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057)-707-60-58; e-mail: Oksana.Tatarinova@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3090-8469>

Аніщенко Галина Оттівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-63-73; e-mail: Halyna.Anishchenko@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-4980>

Anisichenko Halyna – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057)-707-63-73; e-mail: Halyna.Anishchenko@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-4980>