

Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, П. І. ПАЛАМАРЧУК, О. К. МОРАЧКОВСЬКИЙ

ПОВЗУЧИСТЬ ТА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ОБОЛОНКИ ТВЕЛУ ПРИ СТАТИЧНОМУ ТА ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

В статті представлено підхід до розв'язання задачі повзучості оболонки твєлу ядерного реактору за умов його контактної взаємодії з фіксуємим елементом за допомогою спеціально розробленої користувацької процедури для програмного комплексу скінченноелементного аналізу. Розглядаються випадки незмінного у часі та циклічного навантаження, яке обумовлено дією потоку, що омиває твєл. Задачу розв'язано на основі повної тривимірної постановки, розглянуто матеріали з ізоотропією властивостей повзучості та накопичення пошкоджень. У випадку аналізу циклічного деформування з накопиченням прихованих пошкоджень враховуються амплітудні контактні напруження та напруження, що виникають при вимушених коливаннях твєлу. Для врахування процесів накопичення прихованих пошкоджень внаслідок повзучості використано спеціально розроблену процедуру для додавання до розрахункової схеми функції інтегрування у часі еволюційного рівняння для скалярного параметру пошкоджуваності. В даній процедурі у випадку врахування циклічного навантаження також виконується перехід до еквівалентної задачі повзучості, отриманої шляхом використання методу двох масштабів часу та осереднення на періоді, визначаються функції асиметрії циклу напружень для кожної точки інтегрування скінченноелементної моделі. Отримано результати чисельного моделювання повзучості оболонки твєлу при її контакті з елементом фіксації для випадку статичної та динамічної повзучості. Матеріал оболонки – цирконієвий сплав. У випадку врахування циклічного навантаження продемонстровано суттєве прискорення процесів повзучості й накопичення прихованих пошкоджень та зменшення часу до виникнення макроскопічного дефекту. Визначено місце його виникнення, яке відповідає внутрішній поверхні оболонки твєлу навпроти розташування елемента фіксації.

Ключові слова: повзучість, пошкоджуваність, циклічне навантаження, оболонка твєлу, користувацька процедура.

D. BRESLAVSKY, P. PALAMARCHUK, O. MORACHKOVSKY

CREEP AND DAMAGE OF FUEL ROD CLADDING UNDER STATIC AND CYCLIC LOADING

The paper presents an approach to solving the problem of creep of the nuclear reactor fuel rod cladding under the conditions of its contact interaction with the fixing element using a specially developed user subroutine for the finite element analysis software. The cases of time-invariant and cyclic loading, which is caused by the action of the flow washing the fuel, are considered. The problem is solved on the basis of a full three-dimensional formulation, materials with isotropy of creep-damage properties are considered. In the case of analysis of cyclic deformation with accumulation of hidden damage, amplitude contact stresses and stresses arising during forced oscillations of the fuel rod are taken into account. To take into account the processes of accumulation of hidden damage due to creep, a specially developed subroutine is used to add to the calculation scheme the function of integration in time of the evolution equation for the scalar damage parameter. In this subroutine, in the case of taking into account the cyclic loading, a transition to the equivalent creep problem is also performed, obtained by using the method of two time scales and averaging over the period, the stress cycle asymmetry functions are determined for each integration point of the finite element model. The results of numerical simulation of the creep of the fuel cladding when it is in contact with the fixing element for the case of static and dynamic creep are obtained. The cladding material is zirconium alloy. In the case of taking into account cyclic loading, a significant acceleration of creep processes and accumulation of hidden damage and a reduction in the time to the occurrence of a macroscopic defect are demonstrated. The place of its occurrence is determined, which corresponds to the inner surface of the fuel cladding opposite the location of the fixing element.

Key words: creep, damage, cyclic loading, fuel cladding, user

subroutine.

Список літератури

1. Lee J. C. Nuclear reactor physics and engineering / J. C. Lee. – John Wiley & Sons. – 2024.
2. Wagih M. Fuel performance of chromium-coated zirconium alloy and silicon carbide accident tolerant fuel claddings / M. Wagih, B. Spencer, J. Hales, K. Shivran // *Annals of Nuclear Energy*. – 2018. – Т. 120. – С. 304-318.
3. Бреславський Д.В. Деформування та довготривала міцність конструктивних елементів ядерних реакторів. / Д.В. Бреславський. - Монографія. – Харків, Друкарня Мадрид. – 2020. – 249 с.
4. Pandey M. D. Understanding the mechanics of creep deformation to develop a surrogate model for contact assessment in CANDU® fuel channels / M. D. Pandey, F. J. Tallavo, N. C. Christodoulou, B. Leitch, G. A. Bickel // *Nuclear Engineering and Design*. – 2018. – Т. 330. – С. 141-156.
5. Spencer B. W. Improved LWR fuel rod mechanics models / B. W. Spencer, R. J. Gardener // Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States), 2018. – №. INL/EXT-18-44749-Rev000.
6. Capps N. Characterization of modeling and experimental data inconsistencies from burst testing for high-burnup commercial fuel rod applications / N. Capps, R. Sweet // *Journal of Nuclear Materials*. – 2022. – Т. 563. – С. 153621.
7. Yadav A. K. Experimental and numerical investigation on thermo-mechanical behavior of fuel rod under simulated LOCA conditions / A. K. Yadav, C. H. Shin, S. U. Lee, H. C. Kim // *Nuclear Engineering and Design*. – 2018. – Т. 337. – С. 51-65.
8. Ghasabian M. A steady-state performance analysis of fuel rods with accident tolerant claddings for a WWER reactor / M. Ghasabian, S. Talebi, O. Safarzadeh // *Progress in Nuclear Energy*. – 2025. – Т. 185. – С. 105782.
9. Patra A. Finite element simulation of gap opening between cladding tube and spacer grid in a fuel rod assembly using crystallographic models of irradiation growth and creep / A. Patra, C. N. Tomé // *Nuclear Engineering and Design*. – 2017. – Т. 315. – С. 155-169.
10. Lee A. K. Finite Element Analysis of an Empty 37-Element CANDU® Fuel Bundle to Study the Effects of Pressure Tube Creep / A. K. Lee, D. Wowk, P. Chan // *CNL Nuclear Review*. – 2021. Т. 10(1). – С. 39-51.
11. Lys S. S. Calculation of Fuel Rod Strength Under Steady-State Operating Condition / S. S. Lys // *Materials Science*. – 2024. – Т. 59. – №. 5. – С. 585-590.
12. Ding M. A review of the development of nuclear fuel performance analysis and codes for PWRs / M. Ding, X. Zhou, H. Zhang, H. Bian, Q. Yan // *Annals of Nuclear Energy*. – 2021. – Т. 163. – С. 108542.

© Д. В. Бреславський, П. І. Паламарчук 2025

13. Wang H. The effect of coupled wear and creep during grid-to-rod fretting / H. Wang, Z. Hu, W. Lu, M. D. Thouless // *Nuclear Engineering and Design*. – 2017. – Т. 318. – С. 163-173.
14. Бреславський Д. Комп'ютерне моделювання повзучості циліндра при його контакті зі стрижнями напівциліндричного перерізу / Д. Бреславський, П. Паламарчук // Вісник НТУ "ХПІ": Серія "Динаміка та міцність машин". – 2023. – № 1. – С. 57-63.
15. Breslavsky D. Creep and Fretting Wear Modelling for Rod-Cylinder Periodical Contacts / D. Breslavsky, P. Palamarchuk, H. Altenbach // *Advanced Structured Materials*. State of the Art and Future Trends in Materials Modelling 2. – Springer, Cham. – 2024. vol 200. – С. 75-98.
16. Lemaitre J. *Mechanics of Solid Materials* / J. Lemaitre, J. L. Chaboche // – Cambridge University Press. – 1990. – 556 с.
17. Zienkiewicz O. C. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics* / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, D. Fox // – Butterworth-Heinemann. – 2014.
18. Breslavskii D. V. Nonlinear creep and the collapse of flat bodies subjected to high-frequency cyclic loads / D. V. Breslavskii, O. K. Morachkovskii // *International Applied Mechanics*. – 1998. – vol. 34(3). – pp. 287–292.
19. Морачковський О. К. Розробка методів розрахунку на повзучість анізотропних елементів машинобудівних конструкцій / О. К. Морачковський // Дис. докт. техн. наук. – Х.: «ХПІ», 1985. – 409 с.
20. ANSYS® Academic Research, Release 24.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, ANSYS, Inc.
21. ANSYS® Academic Research, Release 24.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL Programmer's Reference, ANSYS, Inc.
15. Breslavsky D., Palamarchuk P., Altenbach H. Creep and Fretting Wear Modelling for Rod-Cylinder Periodical Contacts // *Advanced Structured Materials*. State of the Art and Future Trends in Materials Modelling 2. Springer, Cham. 2024, vol 200, p. 75-98.
16. Lemaitre J., Chaboche J. L. *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge University Press. 1990. 556 p.
17. Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., Fox D. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Butterworth-Heinemann. 2014.
18. Breslavsky D. V., Morachkovskii O. K. Nonlinear creep and the collapse of flat bodies subjected to high-frequency cyclic loads // *International Applied Mechanics*. 1998, vol. 34, issue 3, p. 287–292.
19. Morachkovskii O. K. Rozrobka metodiv rozrakhunku na povzuchist anizotropnykh elementiv mashynobudivnykh konstrukttsii. Dissertation of the Dr. Sc. Kharkiv: NTU "KhPI". 1985. 409 p.
20. ANSYS® Academic Research, Release 24.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL Theory Reference, ANSYS, Inc.
21. ANSYS® Academic Research, Release 24.2, Help System, ANSYS Mechanical APDL Programmer's Reference, ANSYS, Inc.

• Надійшла (received) 15.06.2025

References (transliterated)

1. Lee J. C. *Nuclear reactor physics and engineering*. John Wiley & Sons, 2024.
2. Wagih M., Spencer B., Hales J., Shivran K. Fuel performance of chromium-coated zirconium alloy and silicon carbide accident tolerant fuel claddings // *Annals of Nuclear Energy*. 2018, vol. 120, p. 304-318.
3. Breslavsky D. *Deformuvannya ta dovhotryvala mitsnist konstruktyvnykh elementiv yadernykh reaktoriv*. Monography. Kharkiv, Drukarnia Madryd, 2020. 249 p.
4. Pandey M. D., Tallavo F. J., Christodoulou N. C., Leitch B., Bickel G. A. Understanding the mechanics of creep deformation to develop a surrogate model for contact assessment in CANDU® fuel channels // *Nuclear Engineering and Design*. 2018, vol. 330, p. 141-156.
5. Spencer B. W., Gardener R. J. Improved LWR fuel rod mechanics models. Idaho National Lab. (INL), Idaho Falls, ID (United States). 2018, №. INL/EXT-18-44749-Rev000.
6. Capps N., Sweet R. Characterization of modeling and experimental data inconsistencies from burst testing for high-burnup commercial fuel rod applications // *Journal of Nuclear Materials*. 2022, vol. 563, #153621.
7. Yadav A. K., Shin C. H., Lee S. U., Kim H. C. Experimental and numerical investigation on thermo-mechanical behavior of fuel rod under simulated LOCA conditions // *Nuclear Engineering and Design*. 2018, vol. 337, p. 51-65.
8. Ghasabian M., Talebi S., Safarzadeh O. A steady-state performance analysis of fuel rods with accident tolerant claddings for a WWER reactor // *Progress in Nuclear Energy*. 2025, vol. 185, #105782.
9. Patra A., Tomé C. N. Finite element simulation of gap opening between cladding tube and spacer grid in a fuel rod assembly using crystallographic models of irradiation growth and creep // *Nuclear Engineering and Design*. 2017, vol. 315, p. 155-169.
10. Lee A. K., Wowk D., Chan P. Finite Element Analysis of an Empty 37-Element CANDU® Fuel Bundle to Study the Effects of Pressure Tube Creep // *CNL Nuclear Review*. 2021, vol. 10, issue 1, p. 39-51.
11. Lys S. S. Calculation of Fuel Rod Strength Under Steady-State Operating Condition // *Materials Science*. 2024, vol. 59, issue 5, p. 585-590.
12. Ding M., Zhou X., Zhang H., Bian H., Yan Q. A review of the development of nuclear fuel performance analysis and codes for PWRs // *Annals of Nuclear Energy*. 2021, vol. 163, #108542.
13. Wang H., Hu Z., Lu W., Thouless M. D. The effect of coupled wear and creep during grid-to-rod fretting // *Nuclear Engineering and Design*. 2017, vol. 318, p. 163-173.
14. Breslavsky D., Palamarchuk P. Комп'ютерне моделювання

Відомості про авторів/ About the Authors

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>

Паламарчук Павло Ігорович – аспірант кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-707-64-54; e-mail: Pavlo.Palamarchuk@infiz.khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7788-3707>

Palamarchuk Pavlo – Ph.D. student at the Department of Computer Modeling of Processes and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057)-707-64-54; e-mail: Pavlo.Palamarchuk@infiz.khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7788-3707>

Морачковський Олег Костянтинович – 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: Oleg.Morachkovyi@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5466-5110>

Morachkovsky Oleg – 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: Oleg.Morachkovyi@khpi.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5466-5110>