

АНОТАЦІЯ

Сапужак Я.І. Моделі та розрахункові методи оцінювання впливу наводнювання металу на довговічність елементів енергетичного обладнання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11–Математика та статистика за спеціальністю 113–Прикладна математика. – Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена моделюванню впливу наводнювання металу на напружено-деформований стан (НДС) та розробці методів прогнозування довговічності елементів конструкцій за тривалої експлуатації з урахуванням впливу водню та корозивного середовища. *Об'єктом дослідження* є пошкодження матеріалу в околі концентратора напружень за дії довготривалих навантажень і наводнювання. *Предметом дослідження* є моделі та методи для оцінювання міцності та довговічності елементів конструкцій за дії водневомісного середовища та довготривалого високотемпературного навантаження.

Оцінюючи міцність елементів конструкцій, що експлуатуються за високих температур і складних навантажень, необхідно враховувати повзучість матеріалу з нагромадженням незворотної деформації і пошкодження, що призводить згодом до появи тріщини. Під час експлуатації такі елементи зазнають впливу різних чинників: температурного поля, фізико-хімічної дії внутрішнього агресивного середовища та інше. Зокрема, в якості фізико-хімічного реагента може виступати водневмісне середовище або сам водень.

Головною метою такої оцінки є коректне визначення часу до руйнування конструкції. Для вирішення цього завдання в рамках континуальної теорії пошкодження запропоновано концепцію

нагромадження пошкоджень матеріалом об'єкта. Вважається, що воно відбувається безперервно і є результатом сукупного впливу декількох експлуатаційних чинників. Отже, технічний стан матеріалу такого об'єкта у будь-який момент часу можна виразити через критерій пошкодження і оцінити залишковий ресурс обладнання на основі результатів досліджень кінетики нагромадження пошкоджень.

У роботі виконано аналітичний огляд сучасних моделей нагромадження пошкодження для складного напруженого стану. Основним напрямком розвитку континуальної теорії пошкодження є уточнення визначальних співвідношень із накопиченням експериментальних даних. Часто це призводить до збільшення кількості структурних параметрів і складності одержуваних рівнянь пошкодження. На жаль, перевірити правильність тієї чи іншої моделі пошкодження неможливо. Можна тільки сказати, наскільки добре модель наближує деякий набір експериментальних даних. Конкретний вид функції пошкодження вибирається виключно з міркувань найкращого опису конкретних експериментальних даних за допомогою набору визначальних параметрів: навантаження, температури, параметра пошкодження, деформації повзучості і т. п.

З огляду на це є актуальною проблема адекватного визначення напруженого стану конструктивних елементів за умов експлуатації з урахуванням їх реальної геометрії, наводнювання металу, локальних пошкоджень та оцінка на цій основі їх експлуатаційного ресурсу, можливостей і умов їх подальшого використання.

З урахуванням проведеного аналізу в роботі поставлено та вирішено важливе для енергетики України науково-технічне завдання з прогнозування міцності та довговічності конструктивних елементів енергетичного обладнання з урахуванням можливого їх наводнювання. Обґрунтована методика проведення досліджень і математичний апарат, що використовується в дослідженні. Для розв'язання сформульованих наукових задач використовувалися методи механіки деформівного твердого тіла, насамперед теорії повзучості та континуальної механіки пошкоджуваності.

Числові дослідження здійснювалися методом скінченних елементів у середовищі програмного комплексу MSC Marc Mentat 2016, у якому створювалися тривимірні комп'ютерні моделі елементів конструкцій.

Удосконалено методику і програмне забезпечення для оцінювання міцності та довговічності елементів конструкцій в умовах повзучості і наводнювання металу за тривалої експлуатації на основі енергетичного підходу. Вперше розроблено математичні моделі та розроблено алгоритм для їх реалізації з метою оцінювання впливу водню та корозивного середовища на нагромадження пошкодження в металі за повзучості на базі енергетичного підходу. Вперше визначено НДС та довговічність прямолінійної ділянки теплообмінних труб трьох типів парогенераторів, виготовлених із нержавіючої хромонікелевої сталі аустенітного класу 08X18H10T за різних значень тисків робочого середовища та концентрації хлоридів в корозивному середовищі.

Усі теоретичні розробки дисертації доведено до конкретної інженерної методики для прогнозування безпечної експлуатації елементів енергетичного обладнання з урахуванням дії експлуатаційного середовища.

Розроблені моделі, методи та програмне забезпечення використані у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України під час виконання теми відомчого замовлення НАН України у відділі міцності матеріалів і конструкцій у водневмісних середовищах (НДР III-144-18, № держреєстрації 0118U000464, 2018 – 2020 рр.).

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблений теоретико-експериментальний підхід на сучасній науково-методичній базі, та створення засобів оперативної діагностики стану устаткування дають змогу прогнозувати надійність і довговічність з урахуванням умов експлуатації.

За результатами досліджень опубліковано 15 наукових праць, зокрема: 5 статей у наукових фахових виданнях (з них 4 статті у періодичних наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних WoS або Scopus), 10 тез та доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Ключові слова: наводнювання металу, концентрація водню, корозійне середовище, повзучість, напружено-деформований стан, енергія деформування, енергетичний підхід, пошкодження, довговічність.

SUMMARY

Sapuzhak Y.– Models and calculation methods of estimating the impact of metal hydrogenation on the durability of power equipment elements.

Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 11 Mathematics and Statistics in specialty 113 Applied mathematics. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, 2021.

The thesis is devoted to the modeling of the influence of hydrogenation of metal on a stress-strain state and development of methods of forecasting of the durability of elements of designs at long operation taking into account influence of hydrogen and corrosive environment. The object of the study is material damage in the neighborhood of the stress concentrator under the action of long-term loads and hydrogenation. The subject of the research is mathematical models and methods for estimating the strength and durability of structural elements under the action of a hydrogen-containing environment and long-term high-temperature load.

The thesis presents an analytical review of recent models and methods for evaluating and ensuring the strength and durability of power equipment elements. It has been concluded that the existing models and methods do not take into account the specific features of the influence of hydrogen on the mechanical properties and accumulation of damage in the metal, especially under long-term high-temperature loading. This is because predicting the behavior of structures over time to determine their durability under constant or variable operating conditions becomes a very complex problem of modeling the flow of a set of different processes going at different speeds at different points of the structure and requires special algorithms for their solution. Considering the analysis, the thesis sets and solves an important scientific and technical task for the energy of Ukraine for predicting the strength and durability of structural elements of power

equipment, taking into account their possible hydrogenation. The method of conducting research and the mathematical apparatus used in the research is substantiated. Methods of mathematical modeling are based on the approaches of the mechanics of deformable body and energy criterion of fracture.

Methodology and software for assessing the strength and durability of structural elements in terms of complete control and management of material state for long-term operation based on the energy approach were improved. The developed mathematical models and the developed algorithm for their realization using an estimation of results of conducting and the corrosive environment of accumulation of harmful processes in metals at the expense of influence on the base of the energy approach are improved. For the first time, the stress-strain state and the duration of the rectilinear section of heat exchange pipes of three types of steam generators made of austenitic chromium-nickel stainless steel 08X18H10T for the different working environment and chloride concentrations in the corrosive environment were determined.

All theoretical developments of the thesis are brought to a concrete engineering technique and algorithms with the application of the offered information technology of estimation and forecasting of safe operation of elements of the power equipment taking into account action of the operating environment.

Developed models and methods, information, and software were used in the Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, during the implementation of the project of National Academy of Sciences of Ukraine III-144-18 in the Department of Strength of Materials and Structures in Hydrogen-Containing Environments (State Registration 0118U000464, 2018 - 2020).

The practical value of the thesis consists in that developed theoretical and experimental approach on a modern scientific and methodological basis and the creation of tools for rapid diagnosis of equipment allow to predict its reliability and durability considering operating conditions.

The research results were published in 15 scientific works, in particular: 5 articles in scientific professional publications (4 of them in periodicals of other OECD countries and/or the European Union, professional publications of Ukraine

of category "A", or foreign publications included in the international scientometric databases WoS or Scopus), 10 abstracts and reports in the conference proceedings.

Keywords: metal hydrogenation, hydrogen concentration, corrosive environment, creep, stress-strain state, deformation energy, energy approach, damage, durability.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті в наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection

1. Ivanytskyi Ya., Kharchenko Ye., Hembara O., Chepil O., **Sapuzhak Ya.**, Hembara N. The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation // *Procedia Structural Integrity*. – 2019. – 16. – С. 126–133. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.031 (**Scopus, WoS**).
2. Andreykiv O., Hembara O., Dolinska I., **Sapuzhak Ya.**, Yadzhak N. Prediction of Residual Service Life of Oil Pipeline Under Non-stationary Oil Flow Taking into Account Steel Degradation // *Lecture Notes in Civil Engineering*. – 2020. – 102. – P. 203-216. DOI 10.1007/978-3-030-58073-5 (**Scopus, WoS**).
3. Hembara O., Chepil O., Hembara T., Mochulskyi V., **Sapuzhak Ya.** Influence of temperature and hydrogen on fatigue fracture of 10kh15n27t3v2mr steel // *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. – Warsaw 2020 – 58, 1. – P. 3-15. DOI: 10.15632/jtam-pl/115214 (**Scopus, WoS**).
4. Song W.-G., Hembara O. V., **Sapuzhak Ya. I.** Mathematical modeling of the influence of hydrogen on the corrosion activity of metal structures // *Materials science*. – 2020. – 56, №1. – P. 66-74. DOI: 10.1007/s11003-020-00398-x (**Scopus, WoS**).

Статті в наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України

5. Zhigang Liu, Чепіль О.Я., Сапужак Я.І. Математичне моделювання нагромадження пошкоджень в умовах повзучості та корозійного розтріскування конструкційних матеріалів // *Фіз. - хім. механіка*

матеріалів. – 2020. – № 6. – С. 38-44.

Тези та матеріали міжнародних наукових конференцій

6. Чепіль О.Я., Сапужак Я.І. Оцінка довговічності барабана котла виготовленого зі сталі 22к з урахуванням впливу водню. *Конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України: XXV відкрита наук.-техн. конф., 27–29 вересня 2017 р.: матеріали.* Львів, ФМІ, 2017. С. 49–52.
7. Апробація енергетичного підходу для моделювання нагромадження пошкодження в металі елементів енергетичного обладнання / Я. Іваницький, О. Гембара, О. Чепіль, Я. Сапужак // Сучасні проблеми механіки та математики: зб. наук. праць у 3-х т. / за заг. ред. А.М. Самойленка та Р.М. Кушніра // Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. 2018. Т. 1. С. 95–96.
8. Методика оцінювання циклічного ресурсу елементів енергетичного обладнання з урахуванням впливу водню / О. Гембара, О. Чепіль, Т. Гембара, Я. Сапужак // *Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: 6–а міжн. наук.-техн. конф., 25–26 жовт. 2018 р.: тези доповідей.* Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2018. С. 31–33.
9. Гембара О.В., Сапужак Я.І., Гембара Н.Т. Методика продовження терміну експлуатації обладнання АЕС України з урахуванням впливу водню // *Проблеми сучасної ядерної енергетики. Тези доп. XIV міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та фахівців: 14–16 лист. 2018: Харків, вид. ХНУ, 2018.* С. 27.
10. The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation / Ya. Ivanytskyi, Ye. Kharchenko, O. Hembara, O. Chepil, Ya. Sapuzhak, N. Hembara / *Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity: Book of abstracts of the 6th International Conference (June 3–6, 2019, Lviv, Ukraine) / Edited by V. Panasyuk.* Lviv: Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU, 2019. P. 64–65.

11. Моделювання впливу водню на нагромадження пошкодження в металі за повзучості / О. Гембара, О. Чепіль, Т. Гембара, **Я. Сапужак** // *Математичні проблеми механіки неоднорідних структур*: зб. наук. праць 10-ї Міжнар. наук. конф. / за заг. ред. Р.М. Кушніра і Г.С. Кіта // Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. 2019. Вип. 5. С. 47–48.
12. **Сапужак Я.І.**, Гембара Н.Т. Оцінка впливу водню на нагромадження пошкодження в металі за повзучості. *Конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України: XXVI відкрита наук.-техн. конф., 25–27 вересня 2019 р.*: матеріали. Львів, ФМІ, 2019. С. 41–42.
13. Моделювання впливу водню на нагромадження пошкодження в металі за повзучості / О. Гембара, О. Чепіль, Н. Гембара, **Я. Сапужак** // *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій*. Тези доповідей Другої міжнар. наук.-техн. конф. пам'яті академіка НАН України В.І. Моссаковського (до сторіччя від дня народження): 10–12 жовт. 2019: Дніпро, вид. ДНУ, 2019. С. 198–199.
14. Моделювання нагромадження пошкодження в металі за енергетичним підходом / **Сапужак Ярослав**, Гембара Назар, Гриненко Михайло // Конференція молодих учених «Підстригачівські читання –2020», м. Львів, 26-28 травня 2020. – 2с. <http://www.iapmm.lviv.ua/chyt2020/abstracts/Hrynenko.pdf>
15. Вплив корозивного середовища на повзучість металу / Гембара О., Чепіль О., **Сапужак Я.**, Гембара Н., Гриненко М. // XV International Conference «*Problems of corrosion and corrosion protection of structural materials*». – Львів, 6-8 жовтня 2020. – С.103-106.