

**Оксана ГЕМБАРА, Ольга ЧЕПІЛЬ, Ярослав САПУЖАК,
Назар ГЕМБАРА, Михайло ГРИНЕНКО**

ВПЛИВ КОРОЗИВНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПОВЗУЧИСТЬ МЕТАЛУ

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України
вул. Наукова 5, м. Львів, 79601, Україна. E-mail: oljach0409@gmail.com*

**Oksana HEMBARA, Olha CHERPIL, Yaroslav SAPUZHAK,
Nazar HEMBARA, Mykhailo GRYNENKO**

EFFECT OF CORROSION ENVIRONMENT ON METAL CREEP

*Karpenko Physico-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine
5, Naukova St., Lviv 79601, Ukraine. E-mail: oljach0409@gmail.com*

ABSTRACT

In the report, based on the previously developed by the authors of the energy approach, is constructed calculated model for determining the durability of structural elements by high-temperature creep in metallic materials under the action of long-term loads and corrosive environment. The developed model was tested on the example of the study of heat exchange tubes manufactured made of stainless steel 12X18H12T, convection surfaces of an intermediate superheater of a steam boiler. It was believed that the temperature of the metal of the heat exchange tubes corresponds to $T = 500^{\circ}\text{C}$ and the working medium, which causes corrosion cracking, acts on the inner surface of the pipes. Boiling solutions of magnesium chloride were taken as the equivalent of the steam-water working medium.

KEY WORDS: *creep, corrosive environment, energy deformation, finite element method, corrosion cracking, durability of structural elements.*

ВСТУП

Повзучість і корозійне розтріскування характерно для елементів обладнання теплових і ядерних енергоустановок, що експлуатуються за високих механічних навантажень та температур і взаємодіють з хлоридовмісними середовищами. Закономірності корозії конструкційних матеріалів в різних середовищах і їх урахування при обґрунтуванні працездатності елементів устаткування об'єктів загального, енергетичного, транспортного та інших галузей машинобудування розглянуті, зокрема, в роботах [1-3]. Врахування механізмів корозійних процесів представляє складну задачу; феноменологічні моделі, що описують прояви корозії, виключають з розгляду механізми корозійних процесів і спрощують визначення ресурсу. Для визначення ресурсу досить врахувати корозійні руйнування, які, як відомо, зводяться до суцільної (загальної) корозії і локальної (місцевої) корозії. Значну небезпеку для багатьох відповідальних елементів обладнання теплових і ядерних енергоустановок представляє корозійне розтріскування - один з видів локальної корозії. Коли внаслідок експлуатації проявляються одночасно декілька механізмів пошкодження конструкційних матеріалів, наприклад повзучість, різні види корозії, ресурс елементів обладнання теплових і ядерних енергоустановок традиційно визначають як найменший ресурс з урахуванням кожного з цих механізмів пошкодження; при цьому, природно, нехтують взаємовпливом на ресурс різних механізмів пошкодження. Такий традиційний підхід може призводити як до занижених, так і завищених оцінок ресурсу елементів обладнання, що призводить до економічних витрат при експлуатації теплових і ядерних енергоустановок, наприклад, при непередбачених

порушеннях нормальної експлуатації або заміни елементів обладнання, які фактично можуть експлуатуватися ще досить тривалий час.

Обґрунтування працездатності таких елементів конструкцій з урахуванням повзучості значно ускладнюється залежністю швидкості повзучості конструкційних матеріалів від багатьох чинників – температури, механічних напружень та робочих середовищ.

У доповіді на основі раніше розвинутого авторами енергетичного підходу [4] побудована розрахункова модель для визначення довговічності елементів конструкцій за високотемпературної повзучості в металевих матеріалах за дії довготривалих навантажень і корозивних середовищ. Верифікацію розробленої моделі проведено на прикладі дослідження теплообмінних труб, які виготовляються з нержавіючих сталей.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Нержавні хромонікелеві сталі аустенітного класу широко застосовуються для виготовлення різноманітних відповідальних елементів обладнання теплових і ядерних енергоустановок. Будучи стійкими проти суцільної корозії, хромонікелеві нержавіючі сталі аустенітного класу виявляють схильність до корозійного розтріскування в хлоридовмісних середовищах.

Для опису нагромадження пошкодження в локальному об'ємі згідно енергетичного підходу вводимо міру пошкодження $\omega(t)$, яка характеризує відношення енергії пружно-пластичного деформування локального об'єму до її критичного значення у водні W_c [4]

$$\omega = W(x, y, z, t) / W_c,$$

де $W(x, y, z, t) = \int_0^t \sigma_{eq}(x, y, z, \tau) \dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}(x, y, z, \tau) d\tau$ – поточне значення енергії деформування; σ_{eq} –

еквівалентні напруження; $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$ – швидкість деформацій повзучості локального об'єму елемента.

Вважається, що до початку експлуатації матеріал був без дефектів, тобто $\omega|_{t=0} = 0$. Умова рівності параметра пошкодження одиниці $\omega(x, y, z, t_*) = 1$ приймається за критерій руйнування і дозволяє визначити час до руйнування зразка t_* .

Експериментальне вивчення корозійного розтріскування аустенітної нержавіючої хромонікелевої сталі часто здійснюють в киплячих розчинах хлориду магнію [5]. Встановлено лінійні залежності логарифма часу руйнування від розтягуючого напруження [1, 6, 7] і процентного вмісту хлориду магнію [5]. Нехтуючи іншими чинниками, на основі цих даних за заданої температури для врахування впливу хлоридовмісного середовища на повзучість металу отримано співвідношення [2]

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^{cr}}{\partial t} = A \sigma_{eq}^m 10^{n\sigma + m_1 \chi},$$

де σ_{eq} – еквівалентні напруження; $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$ – швидкість деформацій повзучості локального об'єму елемента; A , n , m_1 , – константи, що характеризують стійкість сталі до корозійного розтріскування при заданій температурі; χ – відсотковий вміст хлориду магнію у розчині.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Апробацію розробленої моделі проведено на прикладі дослідження теплообмінних труб конвективних поверхонь проміжного пароперегрівача парового котла типу ПГВ-1000. Вони виготовлені з внутрішнім радіусом $r_1 = 17$ mm і зовнішнім радіусом $r_2 = 21$ mm (рис.1 а) з нержавіючої сталі 12Х18Н12Т. Розглядали спрощену модель умов експлуатації теплообмінних труб парогенераторів АЕС з ВВЕР, відповідно з якою вважали, що температура металу теплообмінних труб відповідає $T = 500^\circ\text{C}$ і за робоче середовище, що викликає корозійне розтріскування, приймається теплоносій першого контуру за значення тиску P і концентрації хлориду магнію χ в розчині-еквіваленті робочого середовища другого контуру. Задача полягала у визначенні часу розтріскування теплообмінних труб парогенераторів залежно від

тиску теплоносія першого контуру і концентрації хлориду магнію в розчині-еквіваленті хлоридовмісного водного робочого середовища другого контуру парогенератора.

Результати розрахунків про деформацію металу теплообмінних труб пароперегрівачів парових котлів в умовах повзучості і корозійного розтріскування конструкційних матеріалів представлені на рис. 1 *b*.

На рис.2 показана кінетика нагромадження пошкодження з часом експлуатації з урахуванням впливу корозивного середовища і без урахування для теплообмінних труб парогенератора типу ПГВ-1000 за різних тисків 10, 13, 16 та 20 МПа.

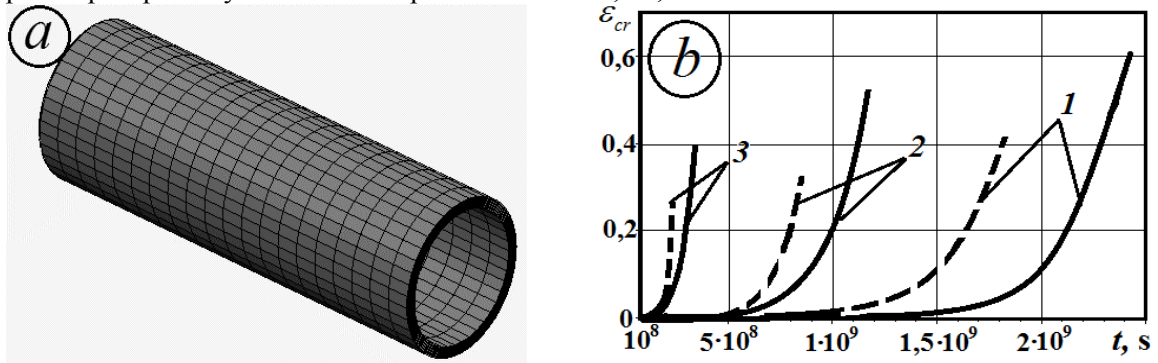


Рис 1. Фрагмент теплообмінної труби (а) та зміна деформацій повзучості з часом (b) в місці максимального значення енергії деформування на зовнішній стінці труби (суцільні криві) та внутрішній стінці (штрихові): без врахування впливу середовища (1), в 5% (2) та в 10 % (3) розчині $MgCl_2$.

Fig.1. Heat exchanger pipe fragment (a) and accumulation of creep strain over time (b) in place of the highest strain energy on the outer wall of the pipe (solid curves), on the inner wall (dashed curves): without considering the environment (1), in 5% (2) and in 10 % solutions $MgCl_2$.

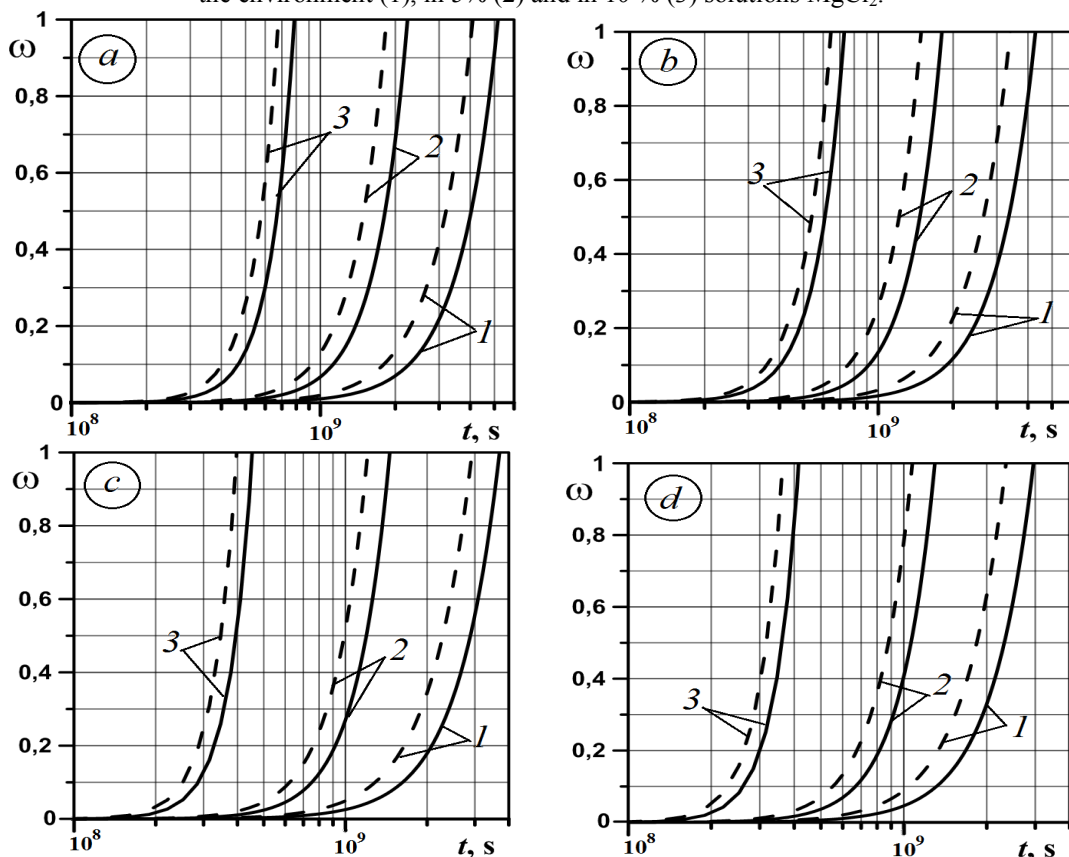


Рис.2. Нагромадження пошкодження з часом в місці максимального значення енергії деформування на зовнішній стінці труби (суцільні криві), на внутрішній стінці (штрихові); без врахування середовища (1), в 5% (2) та в 10 % розчинах $MgCl_2$; а) $P=10$ МПа, б) $P=13$ МПа, в) $P=16$ МПа, д) $P=20$ МПа.

Fig. 2. Accumulation of damage over time in place of the highest strain energy on the outer wall of the pipe (solid curves), on the inner wall (dashed curves); without considering the environment (1), in 5% (2) and in 10 % solutions $MgCl_2$ (3); а) $P=10$ МПа, б) $P=13$ МПа, в) $P=16$ МПа, д) $P=20$ МПа.

На основі отриманих розрахункових даних встановлено залежність довговічності трубчастого зразка від тиску робочого середовища (рис.3).

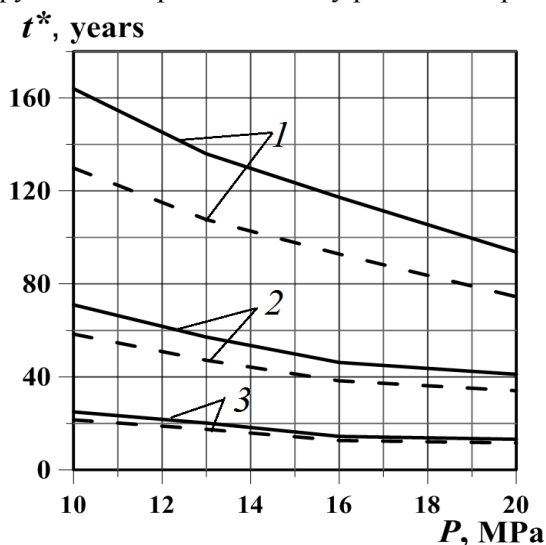


Рис.3. Час до руйнування зразка залежно від тиску на зовнішній стінці труби (суцільні криві), на внутрішній стінці (штрихові); без врахування середовища (1), в 5% (2) та в 10 % (3) розчинах MgCl₂.

Fig. 3. Time to fracture depending on pressure on the outer wall of the pipe (solid curves), on the inner wall (dashed curves); without considering the environment (1), in 5% (2) and in 10 % (3) solutions MgCl₂.

Як бачимо з рис.3 за істотної залежності від тиску P середовища часу розтріскування теплообмінних труб пароперегрівачів парових котлів в умовах повзучості і корозійного чинника відносно незначні відхилення тиску в процесі експлуатації можуть викликати помітне зменшення ресурсу і створювати небезпеку руйнування раніше призначеного терміну служби. Так за тиску 10 МПа довговічність труби складає 160 years без врахування впливу корозивного середовища. Збільшення тиску до 18 МПа зменшує час експлуатації майже вдвічі, до 80 years. Але, як видно з результатів моделювання, підвищення концентрації MgCl₂ в розчині істотно знижує ресурс теплообмінних труб внаслідок інтенсифікації фізико-хімічних процесів при взаємодії поверхні труб з агресивним середовищем. Так у 10 % розчині MgCl₂ довговічність труби скорочується до 25 years, що у 6 разів менше ніж без врахування впливу середовища.

У цих умовах представляють інтерес показники надійності, що характеризують можливість руйнування теплообмінних труб пароперегрівачів парових котлів раніше проектного терміну служби.

ВИСНОВКИ

Отримані результати є основою для оцінювання міцності та надійності елементів конструкцій з урахуванням взаємовпливу на ресурс різних механізмів пошкодження конструкційних матеріалів, що проілюстровано на прикладі теплообмінних труб за експлуатації в умовах повзучості і корозійного розтріскування. Визначено НДС теплообмінних труб парогенераторів, виготовлених із нержавної хромонікелевої сталі аустенітного класу 12X18H12T. Обчислено параметр пошкодження $\omega(t)$ металу труби в розчині хлориду магнію з концентрацією 5 та 10%. Встановлено, що максимально пошкоджується метал на внутрішній стінці труби.

ЛІТЕРАТУРА

1. Morachkovskii O. K., Romashov Y. V. Prediction of the corrosion cracking of structures under the conditions of high-temperature creep // Materials Science. – 2011. – Т. 46, № 5. – С. 613-618.
2. Morachkovskii O. K., Romashov Y. V. Continual model of propagation of corrosion cracks for the evaluation of the service life of structures // Materials Science. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 254-259.
3. Lokoshchenko A. N. Creep and long-term strength of metals in corrosive media (review) // Materials Science. – 2001. – Т. 37, № 4. – С. 559-572.
4. The energy approach to the evaluation of hydrogen effect on the damage accumulation / Y. Ivanytskyi, Y. Kharchenko, O. Hembara, O. Chepil, Y. Sapuzhak, N. Hembara // 6th International Conference Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity, 2019. – С. 126-133.
5. Погодин В. П., Богоявленский В. Л., Сентюров В. П. Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющих сталей в водных средах. – Москва: Атомиздат, 1970. – 424 с.
6. Акользин П.А., Гуляев В.Н. Коррозионное растрескивание аустенитных сталей в теплоэнергетическом оборудовании. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 272 с.
7. Василенко И. И., Мелехов Р. К. Коррозионное растрескивание сталей. – Київ: Наукова Думка, 1977.