



**ДОЛІНСЬКА**

**Ірина Ярославівна** –

доктор технічних наук, старший науковий співробітник відділу акустичних методів та засобів технічної діагностики Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ

За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 23 грудня 2020 року

*Із застосуванням законів термодинаміки сформульовано загальний енергетичний підхід для дослідження заповільненого руйнування конструкційних матеріалів під дією силового навантаження (статичного, циклічного, маневрового режиму його зміни), високих температур, воднево-корозійних середовищ, нейтронного опромінення. На його основі розроблено моделі процесу і методи прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій у зазначених умовах експлуатації. Проведено розрахунок залишкового ресурсу елементів енергетичного устаткування (паропровід, елементи парових турбін), труб нафтогазопроводів, елементів атомних електростанцій та корпусів реакторів гідрокрекінгу нафти.*

**Ключові слова:** довготривала експлуатація, заповільнене руйнування, тріщина, робоче середовище, енергетичний підхід, математична модель, залишковий ресурс.

**Вступ.** Сьогодні в Україні близько 80% елементів конструкцій довготривалого експлуатування вже досягли межі свого розрахункового ресурсу, і гостро постала проблема прогнозування їх залишкового ресурсу. Особливо це стосується елементів енергетичного устаткування, атомних електростанцій, хімічної та нафтохімічної промисловості, трубопровідного транспорту, які працюють під дією довготривалих статичних чи змінних у часі навантажень в умовах широкого діапазону зміни температури і робочого середовища (воденьвмісного, корозійного), нейтронного опромінення. Для них характерним є те, що втрата міцності і вичерпання ресурсу відбувається внаслідок заповільненого руйнування (руйнування внаслідок стрибкоподібного поширення тріщин з досить малими усередненими швидкостями), яке зумовлюють силові та фізико-хімічні чинники [1].

Універсальні підходи для прогнозування залишкового ресурсу таких елементів, які б охоплювали всі вищезгадані чинники, в літературі невідомі. У пропонованій роботі побудовано такий підхід і проведено розрахунок залишкового ресурсу елементів, характерних для інженерної практики України [1, 2].

**Енергетичний підхід.** В основу розроблення загального енергетичного підходу для дослідження заповільненого руйнування матеріалів та елементів конструкцій покладено перший закон термодинаміки, зокрема баланс роботи зовнішніх сил  $A$  і спричинених при цьому в матеріалі енергетичних складових — енергії деформування  $W$  та енергії руйнування  $\Gamma$

$$A(p, P_i) = W(p, P_i, t, S, q, C_0^{(j)}, \Phi_0) + \Gamma(T_0, C_0^{(j)}, S_c, \Phi_0), \quad (1)$$

а також баланс швидкостей їх зміни для елементарного акту руйнування (стрибка тріщини)

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dW}{dt} + \frac{d\Gamma}{dt}; \quad \left( \frac{\partial \Gamma}{\partial S} - \frac{\partial A}{\partial S} + \frac{\partial W}{\partial S} \right) \frac{dS}{dt} + \frac{d\Gamma}{dt} - \frac{dA}{dt} + \frac{dW}{dt} = 0. \quad (2)$$

Тут  $T_0$ ,  $C_0^{(j)}$ ,  $\Phi_0$  — фізико-хімічні чинники;  $p$ ,  $P_i$ ,  $q$  — силові параметри навантаження;  $S_c$  — площа стрибка тріщини;  $S$  — площа тріщини;  $t$  — час.

Отже, для аналітичного опису основних механізмів руйнування матеріалів, тобто зародження і поширення тріщин, отримано загальну математичну модель (3), (4) — диференціальне рівняння з початковою і кінцевою умовами

$$\frac{dS}{dt} = - \frac{\frac{d\Gamma}{dt} - \frac{dA}{dt} + \frac{dW}{dt}}{\frac{\partial \Gamma}{\partial S} - \frac{\partial A}{\partial S} + \frac{\partial W}{\partial S}} \quad (3)$$

$$t = 0, S(0) = S_0; \quad t = t_*, S(t_*) = S_*, \quad (4)$$

де  $dS/dt$  — швидкість поширення тріщини;  $S_0$ ;  $S_*$  — початкова і гранична площі тріщини. Загальне енергетичне рівняння (3) охоплює дію всіх вищенаведених зовнішніх чинників на заповільнене руйнування матеріалів.

Далі для кожного окремого випадку дії конкретного чинника експлуатації енергетичної складові в рівнянні (3) розписуємо в явних функціях, застосовуючи розрахункову модель Леонова–Панасюка–Дагдейла та основні положення фізичної хімії.

Отримані таким чином конкретні математичні моделі покладено в основу розроблення методів для: прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій з тріщинами, які зазнають дії довготривалого статичного або циклічного навантаження за високих температур, що характерно для енергетичного обладнання; оцінювання впливу корозивно-наводнювальних середовищ, нейтронного опромінення на залишковий ресурс елементів конструкцій з тріщинами під дією статичного або змінного в часі навантаження, що характерно для атомних та теплових електростанцій, трубопровідного транспорту; діагностування та прогнозування залишкового ресурсу біметалевих матеріалів, зокрема для установок нафтохімічної промисловості.

Нижче наведено приклади застосування цих методів до прогнозування конкретних елементів інженерної практики.

**Елементи енергетичного устаткування.** Як свідчить експлуатаційна практика, більшість об'єктів тривалого використання працюють за маневрового режиму роботи (наприклад, пуски-зупинки парових турбін). Для надійнішого прогнозування залишкового ресурсу елементів конструкцій необхідно враховувати цей режим, але це — складні задачі, розв'язків яких у літературі не наведено. Відомо, що деякі автори маневровий режим зміни навантаження замінюють статичним навантаженням за малої кількості його зміни. Інші замінюють цей режим малоцикловою втомою, коли є велика кількість таких змін.

Сформульований енергетичний підхід (3), (4) дав можливість побудувати модель, яка є коректною для повного діапазону кількості змін навантаження [3, 4]. Модель застосовано до прогнозування залишкового ресурсу елементів енергетичного устаткування. Проведено розрахунок залишкового ресурсу труби

паропроводу з внутрішньою поверхневою півеліптичною тріщиною за маневрового режиму його експлуатації з урахуванням наводнювання стінки внаслідок дисоціації на ній пари за високої температури і реальних параметрів експлуатації (рис. 1). Мається на увазі реальне значення кількості пусків-зупинок паропроводу  $n = 886$ , а також характеристики сталі 12Х1МФ. На рис. 2 побудовано залежність залишкового ресурсу наводнювальної труби паропроводу від середнього напруження  $\sigma$  в його стінці (крива 3). Ці дослідження добре узгоджуються з результатами розрахунку ресурсу труби без наводнювання її стінки за маневрового (крива 1) і стаціонарного режимів експлуатації (крива 2), які зіставлено з даними напівнатурних досліджень (символи ■ і ●). Як і передбачалося, найменший ресурс труби паропроводу виявили за маневрового режиму експлуатації та її наводнювання. Встановлено, що наводнювання в цьому випадку зменшує ресурс майже втричі.

На прикладі розрахунку залишкового ресурсу диска парової турбіни встановлено періоди, коли маневровий режим експлуатації (пуски-зупинки парової турбіни) можна наближено враховувати за методом стаціонарного режиму (відхилення в розрахунках 11%) або малоциклової втоми (15%) і коли не можна використовувати таку заміну (великі відхилення в розрахунках, які йдуть не в запас довговічності, а в ризик непередбаченого руйнування).

**Труби магістральних нафтогазопроводів.** Застосовуючи загальний енергетичний підхід, побудовано моделі та методи прогнозування залишкового ресурсу труб магістральних нафтогазопроводів [2]. Розраховано залишковий ресурс труби газопроводу зі сталі Х60 із зовнішньою поверхневою корозійною тріщиною за маневрового режиму роботи і безперервного наводнювання її стінки внаслідок катодного захисту. Кількісно оцінено вплив наводнювання на залишковий ресурс труби газопроводу за маневрового режиму експлуатації (рис. 3). Показано, що протекторний захист, який забезпечує трубопровід від загальної корозії, може спричинити локальне водневе руйнування,

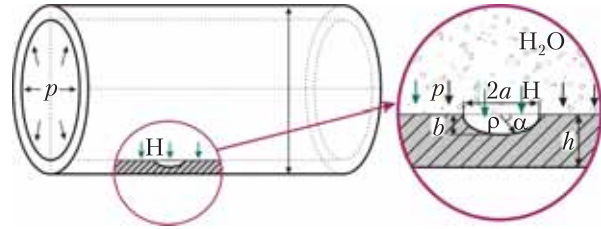


Рис. 1. Схема навантаження труби паропроводу з тріщиною

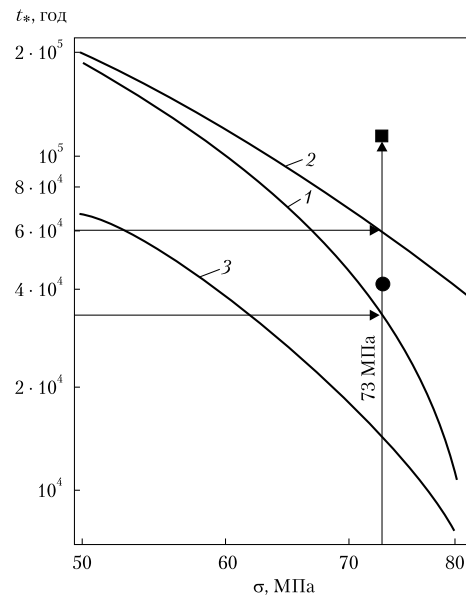
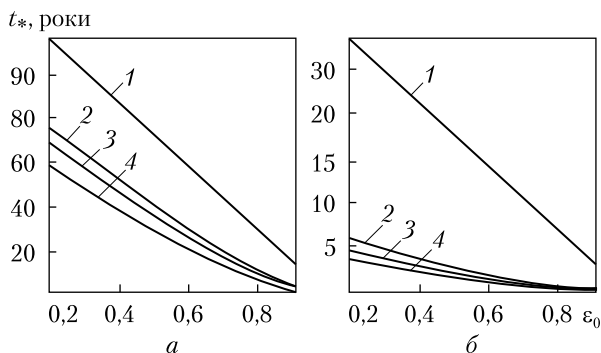


Рис. 2. Залежність залишкового ресурсу  $t_*$  труби паропроводу з тріщиною від середнього напруження  $\sigma$  в його стінці для різних режимів експлуатації: 2 — стаціонарний; 1, 3 — маневровий і маневровий з урахуванням наводнювання стінки відповідно; ■ і ● — дані напівнатурних досліджень

яке істотно зменшує прогнозований ресурс (рис. 3б). Для конкретного випадку труби зі сталі Х60 ресурс може зменшитися до 4 разів, особливо відчутне пониження за маневрового режиму експлуатації (врахування зупинок газопроводу).

Розроблений підхід дав можливість враховувати не тільки дію зовнішніх чинників на залишковий ресурс елементів конструкцій, а й зміну в часі властивостей матеріалу, тобто його деградацію в процесі довготривалої экс-



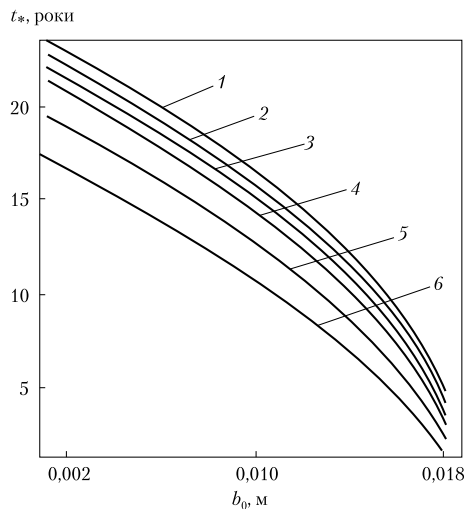
**Рис. 3.** Залежність залишкового ресурсу труби газопроводу від зміни безрозмірного значення  $\varepsilon_0$  початкового розміру тріщини: *a* – наводнювання стінки труби природним газом; *b* – наводнювання за катодного захисту; крива 1 – у стаціонарному режимі; криві 2–4 – у маневровому режимі за різних значень  $n$  (0; 195; 255; 365)

плуатації. Відомі на сьогодні дослідження в цьому напрямі проводяться для постійних властивостей матеріалу. Застосовуючи підхід до конкретного випадку труби газопроводу зі сталі Х52, показано, що врахування деградації зменшує його ресурс до 5 років.

Отримані розрахунки допустимих корозійних дефектів було використано під час розроблення Рекомендацій для ремонту проблемних ділянок труби працюючого етиленопроводу Калуш – Західний кордон довжиною 40 км. Зазначені Рекомендації впроваджено в діяльність ТОВ «Карпатнафтохім».

Проведено розрахунок залишкового ресурсу труби нафтопроводу зі сталі Х60 з корозійною тріщиною за дії турбулентного потоку нафти, гідроударів і деградації матеріалу [5]. В літературі не знайдено методів прогнозування ресурсу нафтопроводів, які б враховували спільну дію турбулентності, гідроударів і деградації матеріалу. Проведені дослідження показали, що дія цих чинників знижує ресурс нафтопроводів, зокрема для труби зі сталі Х60 – до 7 років (рис. 4).

Розроблені нами методи розрахунку залишкового ресурсу нафтопроводів є коректнішими та ефективнішими, оскільки повніше враховують навантаженість матеріалу і механізм

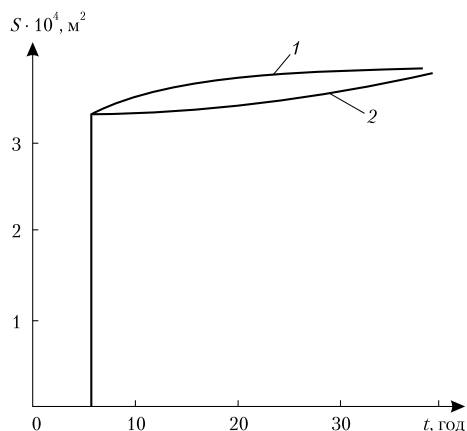


**Рис. 4.** Залежність залишкового ресурсу труби газопроводу від початкової глибини тріщини  $b_0$  і початкового часу її експлуатації  $N_0$ : 1 –  $N_0 = 0$ ; 2 – 50; 3 – 100; 4 – 150; 5 – 300; 6 – 500 циклів

його руйнування. Вони дозволяють поліпшити прогноз залишкового ресурсу нафтопроводів, запобігти витоку нафти з труб і можливим аваріям з негативними екологічними наслідками, особливо коли нафтопровід проходить через річку.

**Елементи атомних електростанцій.** Енергетичний підхід дав змогу не лише розглянути впливи воднево-корозивних середовищ, а й певною мірою врахувати вплив радіаційного опромінення на залишковий ресурс елементів атомних електростанцій, зокрема трубок парогенераторів та корпусу реактора типу ВВЕР-1000 [1].

**Корпус реактора гідрокрекінгу нафти.** Проведено дослідження відшарування наплавки від корпусу реактора гідрокрекінгу нафти внаслідок технологічного процесу – наводнювання і термоциклювання [6]. За результатами експериментальних досліджень складно було встановити причину відшарування. І лише числовий експеримент за допомогою запропонованого нами підходу дав можливість з'ясувати причину відшарування і розробити рекомендації щодо її усунення.



**Рис. 5.** Залежності росту площі  $S$  водневої тріщини від часу  $t$ : 1 – за механічним підходом; 2 – за акустико-емісійним підходом

Причиною відшарування виявилася висока локальна концентрація водню на поверхні поділу, що спричинює утворення та поширення водневих тріщин. Для усунення відшарування необхідно, щоб градієнти характеристик розчинності водню та коефіцієнта дифузії за температурою наплавки і корпусу були однаковими або принаймні досить близькими. Водночас для дослідження відшарування наплавки від корпусу реактора гідрокрекінгу нафти було застосовано метод акустичної емісії. З використанням енергетичного підходу побудовано кінетичні рівняння заповільненого руйнуван-

ня (поширення водневих тріщин) у цьому процесі в параметрах акустичної емісії.

Проведено розрахунок зміни площі водневої тріщини від часу (відшарування наплавки від корпусу) на основі механічного підходу (за силовими параметрами її росту) (крива 1 на рис. 5) та акустико-емісійного підходу (крива 2 на рис. 5). Порівняння цих кривих підтверджує коректність запропонованих у роботі підходів. Отримані при цьому результати мають важливе значення для технічної діагностики зазначених елементів конструкцій.

**Висновок.** Побудовано загальний енергетичний підхід для дослідження заповільненого руйнування матеріалів під впливом силового навантаження і фізико-хімічних чинників. На основі підходу розроблено моделі процесу руйнування та методи прогнозування залишкового ресурсу елементів інженерних конструкцій за спільної дії на них силових і фізико-хімічних чинників.

*Автор висловлює глибоку подяку завідувачу кафедри механіки Львівського національного університету імені Івана Франка члену-кореспонденту НАН України О.Є. Андрейківу та заступнику директора з наукової роботи Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України члену-кореспонденту НАН України В.Р. Скальському за постійну увагу і допомогу в науковій роботі.*

## REFERENCES

### [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Andreykiv O.Ye., Skalskyi V.R., Dolinska I.Ya. *Zapovilnene ruynuvannya materialiv za lokalnoyi povzuchosti (Slow fracture of materials under local creep)*. Lviv: Ivan Franko National University of Lviv, 2017. [in Ukraine] [Андрейків О.Є., Скальський В.Р., Долінська І.Я. *Заповільнене руйнування матеріалів за локальної повзучості*. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2017.]
2. Andreikiv O.Ye., Pustovyi V.M., Rudavskiy D.V., Dolinska I.Ya., Semenov P.O. *Metody otsynuyvannya zalyshkovoyi mitsnosti ta dozhovichnosti elementiv konstruksiy za danyymi neruyinivnoho kontrolyu (Methods for evaluation of residual strength and life-time of structural elements by the non-destructive testing data)*. Lviv: Prostir-M, 2017. [in Ukraine] [Андрейків О.Є., Пустовий В.М., Рудавський Д.В., Долінська І.Я., Семенов П.О. *Методи оцінювання залишкової міцності та довговічності елементів конструкцій за даними неруйнівного контролю*. Львів: Простір-М, 2017.]
3. Dolinska I.Ya. Evaluation of the residual service life of a disk of the rotor of steam turbine with regard for the number of shutdowns of the equipment. *Materials Science*. 2018. **53** (5): 637–644. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0118-y>

4. Andreikiv O.Ye., Skal's'kyi V.R., Dolins'ka I.Ya., Dzyubyk A.R. Influence of corrosive hydrogenating media on the residual service life of structural elements in the maneuvering mode of operation. *Materials Science*. 2018. **54**(1): 61–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0158-3>
5. Andreykiv O., Hembara O., Dolinska I., Sapuzhak Y., Yadzhak N. Prediction of Residual Service Life of Oil Pipeline Under Non-stationary Oil Flow Taking into Account Steel Degradation. In: Bolzon G., Gabetta G., Nykyforchyn H. (eds) *Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems*. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer, 2021. Vol. 102. P. 203–216. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58073-5>
6. Skalskyi V., Andreikiv O., Dolinska I. Assessment of subcritical crack growth in hydrogen-containing environment by the parameters of acoustic emission signals. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. **43**: 5217–5224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.124>

*Iryna Ya. Dolinska*

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1143-8895>

#### FORECASTING OF RESIDUAL RESOURCE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF LONG-TERM OPERATION IN EXTREME CONDITIONS

According to the scientific report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, December 23, 2020

Applying the laws of thermodynamics, a general energy approach is formulated to study the delayed fracture of structural materials under the action of force load (static, cyclic, shunting mode of its change), high temperatures, hydrogen-corrosive media, neutron irradiation. Based on the energy approach process, models and forecasting methods of residual resource of structural elements in the mentioned operating conditions are developed. Based on the energy approach and the basic concepts of the acoustic-emission method, the calculation models in the parameters of the AE signals for the analytical description of the materials and structural elements delayed fracture under exploitation conditions are developed. Residual resource of the elements of power equipment (steam pipeline, elements of steam turbines), oil and gas pipelines, elements of nuclear power plants and the body of the oil hydrocracking reactor, is calculated.

**Keywords:** long-term operation, delayed fracture, crack, working environment, energy approach, mathematical model, residual resource.