

УДК 539.3

**М. Шульженко**

Професор, докт. техн. наук

**П. Гонтаровський**

Ст. наук. співр., канд. техн. наук

**І. Мележик**

Канд. техн. наук

Інститут проблем машинобудування  
ім. А.М. Підгорного НАН України,  
м. Харків

## ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ АГРЕСИВНОГО СЕРЕДОВИЩА НА КІНЕТИКУ ТРІЩИН В ЕЛЕМЕНТАХ ЕНЕРГООБЛАДНАННЯ

*Оцінюється вплив волого-парового середовища на кінетику тріщин в елементах турбін на основі раніше розробленої методики розрахункової оцінки живучості елементів енергетичного обладнання. Діаграми корозійної тріщиностійкості задаються за значеннями в окремих точках, що дозволяє врахувати їхню складну форму. Результати розрахункових досліджень свідчать про значний вплив агресивного середовища на час живучості елементів турбін.*

тріщина, живучість, волого-парове середовище, турбіна, АЕС

У волого-парових турбінах вплив середовища на ерозійну та корозійну стійкість елементів є доволі значним внаслідок дії пари. В дисках роторів у зоні розвантажувальних отворів та обода через високі напруження розтягу може виникати корозійне розтріскування та корозійна втома [1]. Найчастіше пошкоджуються диски, що працюють у зоні початку фазового переходу середовища при температурах 130–150 °С. Робоче середовище і температура істотно впливають на швидкість розвитку втомних тріщин. Так, наприклад, швидкість росту тріщин у морській воді в зразках зі сталі в десять разів вища, ніж у повітрі [2].

Методика розрахункового оцінювання живучості високотемпературних елементів парових турбін, що розроблена раніше [3, 4], базується на принципах механіки крихкого руйнування. Вона ґрунтується на числовому інтегруванні рівнянь розвитку тріщини від початкової її величини до досягнення критичного розміру при багаторежимному статичному та циклічному навантаженнях. При цьому використовується принцип лінійного підсумовування швидкостей росту тріщини на всіх режимах навантаження:

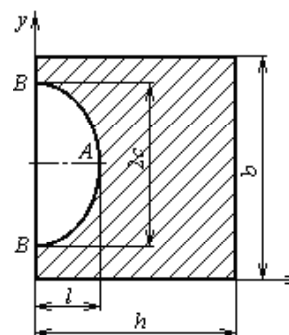


Рис. 1. Переріз елемента в площині тріщини

$$V = \sum_{i=1}^p V_{Ci} t_i + \sum_{j=1}^q V_{Nj} N_j,$$

де  $V$  – усереднена швидкість росту тріщини на всіх режимах роботи, обчислена в точці  $A$  або  $B$  (рис. 1);  $V_{Ci}$  – швидкість росту тріщини при  $i$ -тому статичному режимі в тих же точках;  $V_{Nj}$  – швидкість росту тріщини при  $j$ -

тому циклічному режимі;  $t_i$  – відносний час роботи на  $i$ -тому статичному режимі;  $N_j$  – кількість циклів навантаження на  $j$ -тому циклічному режимі за 1 тисячу годин експлуатації.

Швидкості росту тріщини визначаються за рівняннями Періса для циклічного навантаження:

$$V_{Nj} = \frac{dl}{dN_j} = C_{Nj} (\Delta K_{ej})^{n_{Nj}}, \quad (1)$$

та за рівняннями на випадок повзучості матеріалу [5]:

$$V_{Ci} = \frac{dl}{dt_i} = C_{Ci} (K_{ei})^{n_{Ci}}, \quad (2)$$

де  $l$  – глибина тріщини;  $K_{ei}$  – еквівалентний коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) на  $i$ -тому статичному режимі роботи;  $\Delta K_{ej}$  – розмах еквівалентного КІН на  $j$ -тому циклічному режимі;  $C_{Ci}$ ,  $n_{Ci}$ ,  $C_{Nj}$ ,  $n_{Nj}$  – експериментальні характеристики матеріалу для статичного та циклічного режимів на різних температурах  $T$ .

При цьому використовується МСЕ для врахування складного напруженого стану у вершині тріщини, який характеризується КІН зсувів  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  поряд з КІН нормального відриву  $K_{IC}$ .

За експериментально підтвердженими критеріями руйнування [6]

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIC}}\right)^2 = 1; \quad \left(\frac{K_I}{K_{IC}}\right)^2 + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIC}}\right)^4 = 1,$$

та даними, що наведені в [7, 8],

$$K_{IIC} = v_{II} K_{IC}, \quad K_{IIIC} = v_{III} K_{IC},$$

отримані такі вирази для визначення еквівалентних КІН:

$$K_e = \sqrt{K_I^2 + \left(\frac{K_{II}}{v_{II}}\right)^2} \cdot \text{sign} K_I, \quad (3)$$

або

$$K_e = \sqrt{\frac{K_I^2}{2} + \sqrt{\frac{K_I^4}{4} + \left(\frac{K_{III}}{v_{III}}\right)^4}} \cdot \text{sign} K_I, \quad (4)$$

де  $K_e$  – еквівалентний КІН;  $K_{IC}$ ,  $K_{IIC}$ ,  $K_{IIIC}$  – в'язкість руйнування при відриві та зсувах;  $v_{II}$ ,  $v_{III}$  – співвідношення між в'язкістю руйнування при відриві і зсуві.

Експериментальні дослідження [2, 9 – 11 та ін.] засвідчують помітний вплив напружень від'ємних півциклів навантаження на розвиток тріщини, тому в (3), (4) зберігається знак КІН нормального відриву. При цьому вплив від'ємних півциклів є значно меншим, ніж додатних, що враховується відповідними співвідношеннями [2].

Дж. Р. Ірвіном отримані вирази для полів напружень та деформацій при руйнуванні відривом, поперечним та поздовжнім зсувами. З їх використанням, на основі напружень та переміщень, що визначені за допомогою

МСЕ, обчислюються КІН прямим методом напружень та прямим методом переміщень [12]. Коефіцієнти інтенсивності напружень, що отримані за напруженнями та переміщеннями, усереднюються [4].

У методиці [3, 4], на відміну від інших [5, 13 – 15], враховуються фактори, що впливають на живучість конструкції: асиметрія циклу навантаження, релаксація напружень при повзучості, залежність характеристик матеріалу від температури та зміна їх у часі тощо.

У цій праці методика [3, 4] розвинута на випадок врахування впливу агресивного середовища. При цьому використовуються співвідношення, якими можна описати діаграми корозійної тріщиноустійкості матеріалу:

$$dl/dN = f(\Delta K_e, R, \omega, T), \quad (5)$$

$$dl/dt = f_c(K_e, \omega, T),$$

де  $N$  – кількість циклів навантаження;  $\Delta K_e$  – розмах еквівалентного коефіцієнта інтенсивності напружень;  $R$  – коефіцієнт асиметрії циклу навантаження;  $\omega$  – частота циклічного навантаження.

Діаграми корозійної тріщиноустійкості матеріалу (5) визначаються спеціальними експериментальними випробуваннями в робочому середовищі [16]. При цьому встановлюються порогові значення КІН в умовах корозії  $\Delta K_{hкор}$ .

Діаграми корозійної тріщиноустійкості можуть мати складний вигляд. У цій методиці при дослідженні кінетики тріщини, замість рівнянь (1), (2) пропонується врахувати залежності (5) (задаються в окремих точках у логарифмічних координатах) для кожного режиму циклічного навантаження з конкретними значеннями температури, асиметрії циклу та частоти навантаження.

Величини  $\lg(dl/dN)$  для проміжних значень  $\lg \Delta K_I$  обчислюється за допомогою лінійної чи квадратичної інтерполяції, після чого знаходиться швидкість розвитку тріщини.

Досліджується кінетика тріщини в стінці корпусу турбіни при циклічному навантаженні. Початкові розміри поверхневої півеліптичної тріщини склали:  $l = 1$  мм,  $c = 20$  мм, товщина корпусу – 100 мм. Експериментально отримані базові діаграми циклічної тріщиноустійкості сталі корпусу 15X2МФА подані на рис. 2 [16]. Внутрішній тиск складає 12 МПа. На рис. 3 подано розподіл напружень  $\sigma_z$  за товщиною стінки при режимах з кількістю циклів навантаження – 8,333 циклу за тисячу годин (позначений на рисунку як 1) та 83,33 циклу за тисячу годин (позначений як 2).

На рис. 4 зображено результати розрахунків кінетики тріщини (розміри  $l$  і  $c$ ) на повітрі (а) та в корозійному середовищі (б). На рисунку також показано зміну за часом КІН у вершинах півеліптичної тріщини.

Руйнування корпусу відбувається при розмірах тріщини  $l = 25$  мм,  $c = 39$  мм і досягненні коефіцієнтом інтенсивності напружень свого критичного значення  $\Delta K_{IC} = 80$  МПа $\cdot\sqrt{м}$ . При цьому живучість корпусу в повітрі складає понад 4760 тисяч годин, а в корозійному середовищі – тільки 640 тисяч годин.

Досліджується кінетика тріщини в стінці екранної труби парового котла високого тиску. Початкова глибина

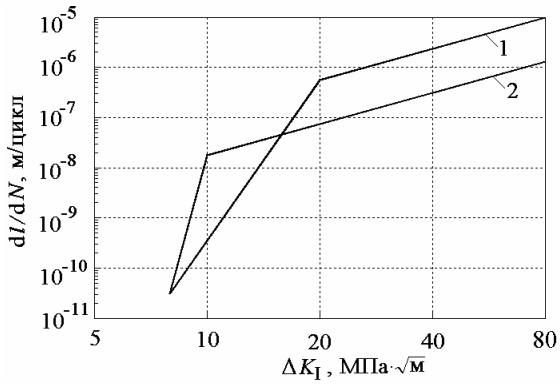


Рис. 2 Базові діаграми циклічної тріщиностійкості сталі 15X2MFA у корозійному середовищі (1) і у повітрі (2)

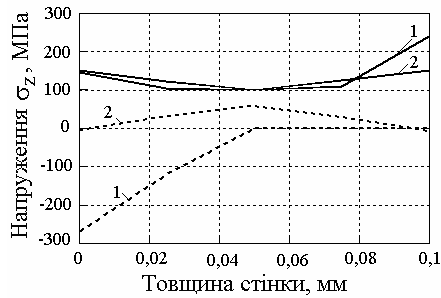


Рис. 3 Розподіл напружень  $\sigma_z$  за товщиною стінки (суцільною лінією показані максимальні в циклі навантаження, штриховою – мінімальні)

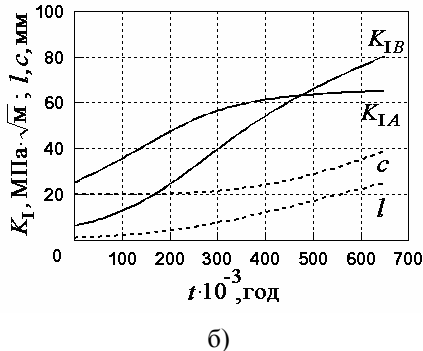
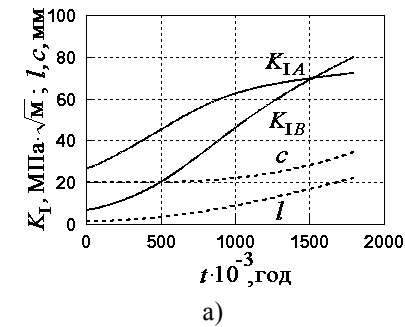


Рис. 4 Результати розрахунків кінетики тріщини в повітрі (а) та в корозійному середовищі (б)

поверхневої тріщини складала  $l = 1,5$  мм, зовнішній радіус труби – 30 мм, товщина труби – 6 мм. Базові діаграми тріщиностійкості сталі 20, з якої виготовлені труби, при

циклічному навантаженні подані на рис. 5 [16] та при повзучості – на рис. 6.

Сталий тиск у трубі складав 15,5 МПа. Кінетика тріщини досліджувалася при статичному навантаженні та при циклічному навантаженні, що обумовлене відхиленнями значень температури:  $\pm 10$  °C (відбувалося 74 рази за добу),  $\pm 15$  °C (25 разів за добу),  $\pm 20$  °C (9 разів за добу),  $\pm 30$  °C (1 раз за два місяця) [16].

На рис. 7 та рис. 8 зображено результати розрахунків кінетики тріщини, що розташована на внутрішній поверхні труби, на повітрі (а) та в корозійному середовищі (б) й наведено зміну за часом КІН у вершині тріщини.

При такому навантаженні, як показали розрахунки, основний внесок у розвиток тріщини дає повзучість. Руйнування труби відбувається через проростання тріщини наскрізь в агресивному середовищі за 192,5 тисячі годин, у повітрі – за 1518 тисяч годин.

Розглянемо циклічне навантаження, при якому температурні відхилення збільшуються на  $\pm 10$  °C від дослідженого раніше.

На рис. 9 та рис. 10 наведені результати оцінювання кінетики тріщини.

При розвитку тріщини в повітрі руйнування труби відбувається через проростання тріщини наскрізь, в

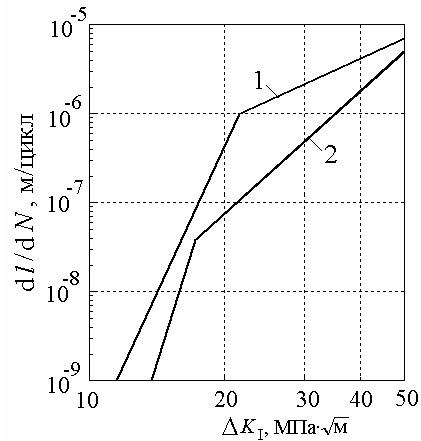


Рис. 5 Базові діаграми циклічної тріщиностійкості сталі 20 у корозійному середовищі (1) і в повітрі (2)

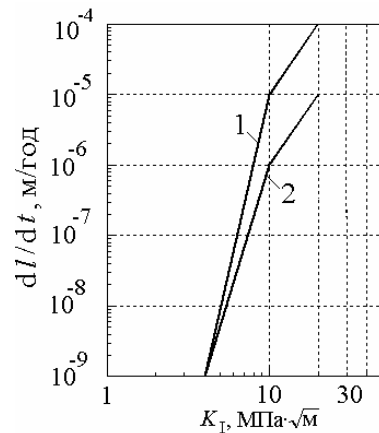


Рис. 6 Базові діаграми тріщиностійкості сталі 20 при повзучості у корозійному середовищі (1) і в повітрі (2)

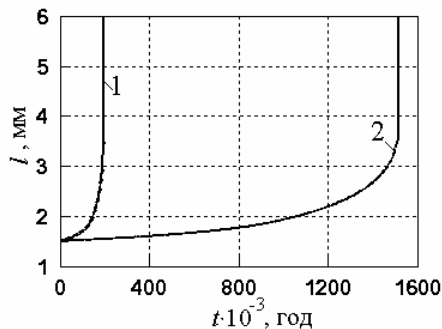


Рис. 7 Зміна глибини тріщини за часом: 1 – в корозійному середовищі, 2 – в повітрі

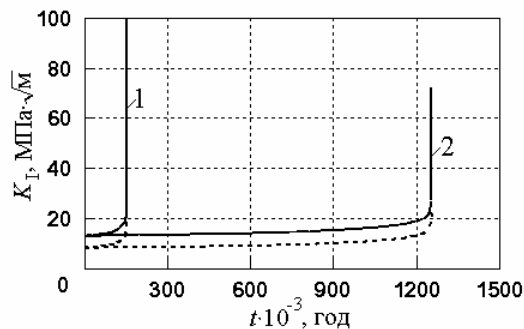


Рис. 10 Зміна КІН за часом: 1 – в корозійному середовищі, 2 – у повітрі (штриховою лінією показані КІН при статичному навантаженні)

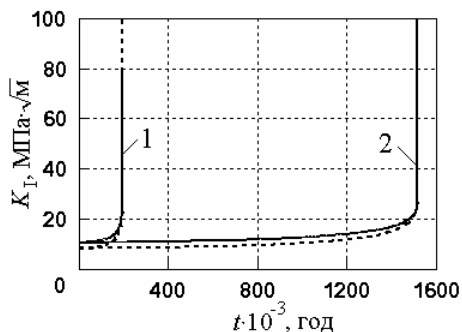


Рис. 8 Зміна КІН за часом: 1 – в корозійному середовищі, 2 – у повітрі (штриховою лінією показані КІН при статичному навантаженні)

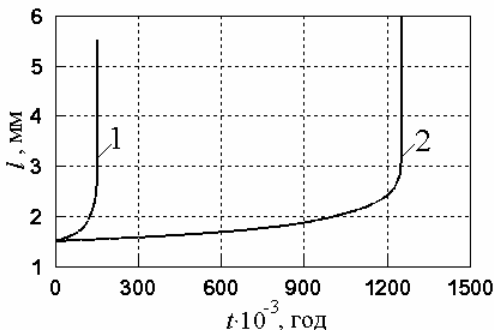


Рис. 9 Зміна глибини тріщини за часом: 1 – в корозійному середовищі, 2 – в повітрі

агресивному середовищі – через досягнення КІН свого критичного значення  $\Delta K_{IC} = 100 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ , при цьому глибина тріщини складає  $l = 5,5 \text{ мм}$ . Як показують розрахунки, в цьому випадку істотно зростає вплив циклічного навантаження на розвиток тріщини. При збільшенні тріщини зростає його внесок у загальну швидкість росту тріщини, а перед руйнуванням складає більше половини.

При дослідженні кінетики тріщини, що розташована на зовнішній поверхні труби, час її розвитку до критичних розмірів збільшується більш, ніж у 2 рази у порівнянні з часом розвитку внутрішньої тріщини. Цей факт пояснюється відсутністю впливу тиску на розвиток тріщини.

Наведені приклади показують, що корозійне середовище може значно зменшувати живучість енергообладнання.

Таким чином, при оцінюванні живучості роторів турбін АЕС, які працюють у зволоженому середовищі, треба враховувати вплив цього фактора. Для цього потрібно мати результати експериментальних досліджень швидкості підростання тріщини в залежності від КІН з впливом чинника, що моделює середовище в проточній частині турбіни.

## Література

1. *Конструкційні матеріали енергетичного обладнання* / Р.К. Мелехов, В.І. Похмурський. – Київ: Наук. думка, 2003. – 374 с.
2. *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник.* / В.П. Когаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
3. *Шульженко Н.Г.* Оценка живучести высокотемпературных элементов турбомашин с трещинами / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, И.И. Мележик // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2004. – № 19. – С. 153 – 160.
4. *Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергетических агрегатов: Монография* / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, Б.Ф. Зайцев – Харьков: ХНАДУ, 2011. – 444 с.
5. *Балина В.С.* О ресурсе высокотемпературных роторов паровых турбин / В.С. Балина, Е.Д. Консон, С.А. Тихомиров // *Теплоэнергетика.* – 1988. – № 7. – С. 21 – 24.
6. *Механика квазихрупкого разрушения материалов* / В. В. Панасюк // К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.
7. *Elastic-Plastic Mixed-Mode Fracture Criteria and Parameters* / Valery N. Shlyannikov, Springer, LNIAM, Vol. 7. – 246 p.
8. *Механика матеріалів для інженерів* / А.О. Лебедєв, М.І. Бобир, В.П. Ламашевський // К.: НТУУ «КПІ», 2006. – 288 с.
9. *Каплун А.Б.* Влияние параметров цикла нагружения на рост усталостных трещин / А.Б. Каплун // *Физико-*

химическая механика материалов. – 1998. – № 4. – С. 58 – 68.

10. *Трещиностойкость* металлов при циклическом нагружении / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко – К.: Наук. думка, 1987. – с. 256.

11. *Bloom J.M.* An approach to account for negative R-ratio effects in fatigue crack growth calculations for pressure vessels based on crack closure concepts / J.M. Bloom // Transactions of the ASME. – February, 1994. – Vol. 116. – P. 30–35.

12. *Вычислительная механика* разрушения / М. Сиратори, Т. Миёси, Х. Мацусита // М.: Мир, 1986. – 334 с.

13. *Берлянд В.И.* Оценка полного и межремонтного ресурсов модернизированных корпусов ЦВД турбин К-200-130-3 ЛМЗ по критериям малоциклового усталости и трещиностойкости / В.И. Берлянд, А.А. Глядя, В.С. Балина, В.Д. Консон, М.Г. Кабелевский, Л. И. Столярова // Теплоэнергетика. – 1991. – №8. – С. 54 – 60.

14. *Шульженко Н.Г.* К оценке живучести элементов паровых турбин на стадии роста трещин / Н.Г. Шульженко, П.П. Гонтаровский, В.В. Пономарёв // Совершенствование турбоустановок методами мат. и физ. моделирования: тр. междунар. науч.-техн. конф. – Харьков, 1997. – С. 541 – 545.

15. *Степаненко С.М.* К вопросу о прочности дисков ГТД с учетом стадии развития усталостных трещин / С.М. Степаненко // Совершенствование турбоустановок методами мат. и физ. моделирования: тр. междунар. науч.-техн. конф. – Харьков, 1997. – С. 537 – 539.

16. *Механіка* руйнування та міцність матеріалів: Довідниковий посібник / Під ред. В.В. Панасюка. Том 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій тепло-енергетичного устаткування / Під ред. І.М. Дмитраха. – Київ: ВД «Академперіодика», 2005. – 378 с.

Отримана 17.11.11

*M. Shulzhenko, P. Gontarovsky, I. Melezhyk*

**Estimation of influence of a hostile environment on cracks kinetics in power equipment elements**

*A. M. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

*Influence of wet-steam environment on cracks kinetics in turbines elements on the base of earlier developed calculation estimation technique of survivability of power equipment elements is being assessed. Corrosion crack resistance diagrams are set on values in separate points that allow taking into account their complex shape. Results of calculation estimations are evidence of considerable influence of a hostile environment on the period of turbines elements survivability.*

---

## Інформація

Міжнародній науково-технічна конференція

### ДИНАМІКА, НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МЕХАНІЧНИХ І БІОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

5 — 9 вересня 2011 р., м. Севастополь

#### Тематика конференції:

- динаміка і міцність, надійність і довговічність механічних і біомеханічних систем;
  - математичне моделювання в теоретичній і прикладній механіці;
- нелінійні коливання, хаотичний рух і самоорганізація в механічних системах;
  - механіка нелінійних процесів пружно-пластичної деформації;
  - матеріали конструкцій і методи їх дослідження;
- методи і прилади контролю робочого стану агрегатів та їхніх елементів, діагностика технічного стану механічних систем;
  - приводи машин і механізмів та їхні елементи;
  - біомеханічні системи;
- технологічне обладнання та процеси обробки елементів механічних і біомеханічних систем;
  - технічне регулювання, стандартизація, розробка методів, норм, методик розрахунків і випробувань механічних і біомеханічних систем.

#### Адреса оргкомітету:

СевНТУ, МНТК «Привод 2011»,

вул. Університетська, 33, м. Севастополь, 99053

Телефони: (0692) 43-52-10; (0692) 43-52-24, (0692) 43-51-61; (0692) 67-40-84

E-mail: [valesan@list.ru](mailto:valesan@list.ru) ; [vpahaliuk@gmail.com](mailto:vpahaliuk@gmail.com) ; [apolyakov.mail@gmail.com](mailto:apolyakov.mail@gmail.com)