

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

УДК 539.3

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ЖИВУЧОСТІ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИНОБУДУВАННЯ З ДАНИМИ ОПУБЛІКОВАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На основі співставлення літературних даних з результатами живучості елементів з тріщинами, що отримані за розвинутою раніше методикою, виконано оцінювання їх узгодження. Значення коефіцієнтів інтенсивності напружень у вершині тріщини в пластинах при розтягу визначаються МСЕ та порівнюються з даними аналітичних розв'язків. Результати оцінювання кінетики тріщини замкових з'єднань газотурбінної установки співставляються з даними натурних обстежень. Показано задовільне погодження отриманих результатів.

тріщина, живучість, коефіцієнт інтенсивності напружень, метод скінченних елементів

У зв'язку з вичерпанням розрахункового ресурсу великої частини елементів електростанцій України значну актуальність набувають питання, що пов'язані з оцінюванням їхнього стану та можливості подальшої експлуатації. Однією з основних причин поломок енергообладнання є поява дефектів типу тріщин. У роторах турбіни тріщини не допускаються на відміну від корпусів турбін [1].

Найбільше розповсюдження при оцінюванні живучості елементів машин отримали методи механіки крихкого руйнування. У високотемпературному енергетичному обладнанні чисто крихке руйнування зустрічається рідко, при цьому в'язка складова процесу уповільнює руйнування [2]. Разом з тим є можливим використання підходів механіки крихкого руйнування при змішаному його характері, оскільки результат буде отримано з запасом.

Одним з параметрів, що характеризує напружено-деформований стан у вершині тріщини та її кінетику, є

коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН). В літературі наводяться аналітичні розв'язки, експериментальні дані, формули для визначення КІН в елементах конкретної геометрії (смуги, пластини, циліндри та ін.) при конкретному вигляді навантаження (розтяг, згин та ін.) [2 – 10]. Однак такі підходи та отримані результати не можуть бути безпосередньо використані для оцінювання живучості елементів роторів і корпусів парових турбін, що експлуатуються при багаторежимному навантаженні, мають складну геометрію і напружено-деформований стан тощо.

Обмеженість у використанні має також метод [11], хоча його застосування рекомендується [1, 12] при оцінюванні живучості елементів енергетичного обладнання.

У працях [13, 14] розвинуто методику на основі використання метода скінченних елементів (МСЕ) для визначення живучості елементів енергомашин з врахуванням асиметрії циклу навантаження, складності напруженого стану в вершині тріщині, релаксації напружень

при повзучості, зміни експериментальних характеристик матеріалу та співвідношення півосей еліптичної тріщини, залежності характеристик матеріалу від температури та інших факторів.

При розповсюджені тріщини в елементах машин здебільшого відбуваються одночасно відрив та поперечний зсув або відрив та поздовжній зсув її берегів. Напружений стан в цьому випадку може характеризуватися відповідно як КІН нормального відриву K_I , так і КІН поперечного K_{II} та поздовжнього K_{III} зсувів.

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 значення КІН прямим методом напружень та прямим методом переміщень [15]. Напружено-деформований стан визначено з використанням найпростіших скінченних елементів (СЕ) (з полілінійною апроксимацією переміщень). Як показали чисельні дослідження [13], для оцінки КІН необхідно використовувати значення напружень та переміщень, що отримані в третьому або четвертому скінченному елементі від вершини тріщини. Значення КІН, що отримані за напруженнями та переміщеннями, пропонується усереднювати, оскільки вони дають відповідно завищений та занижений результати по відношенню до точних значень [13]. Обчислення КІН виконуються для декількох фіксованих глибин тріщини, а для проміжних розмірів КІН визначався за допомогою лінійної або квадратичної інтерполяції.

Руйнування відривом наступає, коли $K_I = K_{IC}$, а зсувом – коли $K_{II} = K_{IIC}$ або $K_{III} = K_{IIIC}$, де K_{IC} , K_{IIC} , K_{IIIC} – в'язкості руйнування матеріалу за макромеханізмами відриву та зсуву, що визначаються експериментально. Еквівалентний коефіцієнт інтенсивності напружень визначається з урахуванням експериментально підтверджених співвідношень $K_{IIC} = v_{II} K_{IC}$, $K_{IIIC} = v_{III} K_{IC}$ (як правило $K_{IIC} \gg K_{IIIC} \gg (0,6-0,8) K_{IC}$ [16]) та критеріїв руйнування так:

$$K_e = \sqrt{K_I^2 + \frac{K_{II}^2}{v_{II}^2}} \cdot \text{sign } K_I,$$

$$K_e = \sqrt{\frac{K_I^2}{2} + \sqrt{\frac{K_I^4}{4} + \frac{K_{III}^4}{v_{III}^4}}} \cdot \text{sign } K_I, \quad (1)$$

де v_{II} , v_{III} – коефіцієнти, що встановлюють зв'язок відповідно K_{IIC} та K_{IIIC} з K_{IC} .

Критичним приймається стан, коли величина еквівалентного КІН на одному з можливих режимів досягає критичного значення (K_{IC} при статичному навантаженні, K_{IF} при циклічному навантаженні):

$$K_e = K_{IC}, \quad K_{e\max} = K_{IF}$$

де K_{IF} – в'язкість руйнування матеріалу при циклічному навантаженні; $K_{e\max}$ – максимальне значення K_e в циклі.

Для оцінювання вірогідності результатів цього методу були виконані розрахунки КІН у вершинах тріщин для пластин [13], а отримані результати порівнювалися з даними для нескінченних смуг, що наведені в літературі.

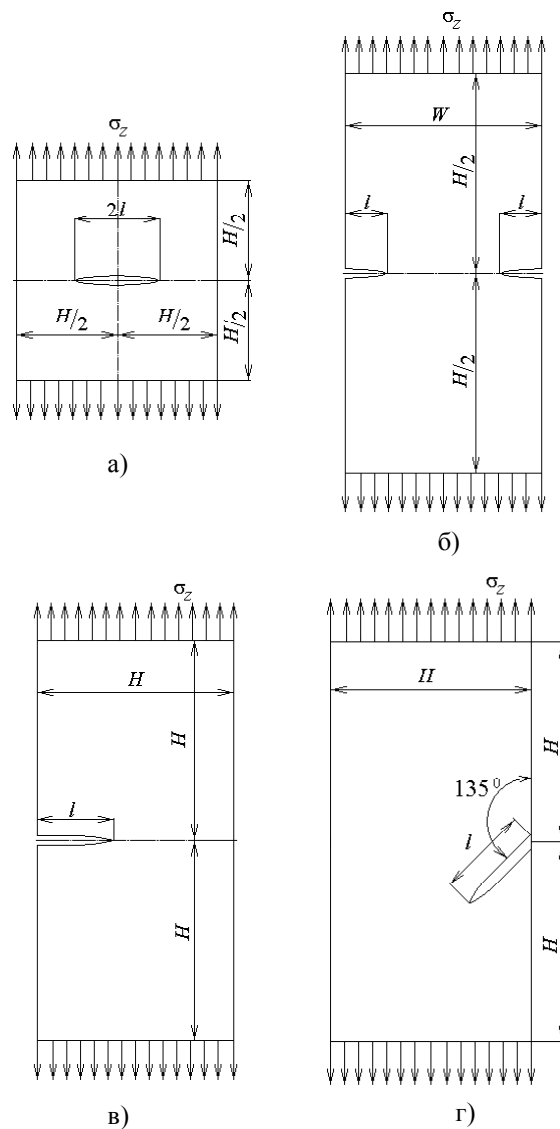


Рис. 1. Розрахункові схеми пластини під дією розтягувальних навантажень за наявності тріщин різної орієнтації

Разом з тим доцільно визначити та порівняти отримані КІН для пластин скінченних розмірів за наявності опублікованих розв'язків у літературі, а також оцінити живучість вузлів конструкцій складної геометрії, для яких є дані експериментальних обстежень.

У цій статті вірогідність методики виконується перевірянням розрахункових даних з опублікованими результатами для пластин [3] та з натурними спостереженнями замкових з'єднань лопатки з диском газотурбінної установки [17 – 19] (даних для інших елементів конструкцій у літературі не знайдено).

Розглянемо пластини під дією розтягу при різноманітному розташуванні в них тріщин (рис. 1) та визначимо КІН в їхніх вершинах.

Розглянуто три варіанти пластин:

– квадратна пластинка, по середній лінії якої по центру розміщена тріщина (рис. 1,а). Розміри пластини $H=10$, 20 та 40 см. З використанням МСЕ отримані КІН для глибин тріщин l в інтервалі від $0,5$ до 5 см (у випадку $H=10$ см – до 4 см);

– прямокутна пластина, вздовж середньої лінії якої симетрично розташовані дві поверхневі тріщини (рис. 1,б). Ширина пластини $W=20$ см, довжина пластини приймала такі значення: $H=5; 10; 20$ та 30 см. Визначалися значення КІН при глибинах тріщини $l=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6$ та 7 см;

– прямокутна пластина містить прямолінійну тріщину, що виходить під кутом 90° (рис. 1,в) та під кутом 135° (рис. 1,г) на одну з її кромки. Ширина пластини $H=15$ см, довжина пластини $2H=30$ см. У випадку тріщини перпендикулярної до кромки пластини розглядалися тріщини глибиною $l=1,5; 3; 4,5; 6; 7,5; 9; 10,5$ см, а під кутом 135° – глибиною $l=1,5$ і $10,5$ см.

В усіх варіантах тріщина вільна від навантаження, на гранях, що паралельні тріщині, задані сталі розтягувальні напруження $\sigma_x=100$ МПа (на інших гранях навантаження відсутнє). Скінченноелементна сітка виконана так, щоб довжина кожного наступного скінченного елемента була меншою від попереднього в два рази, мінімальний скінченний елемент у вершині тріщини є квадрат зі стороною $0,01$ см.

Визначені за запропонованою методикою результати порівнювалися зі значеннями КІН, що отримані модифікованим методом конформних відображень (для пластини варіант 3), модифікованим методом конформних відображень із застосуванням граничних колокацій (варіант 1), методом граничних колокацій (варіант 2) [3]. Результати співставлення наводяться на рис. 2 – рис. 4.

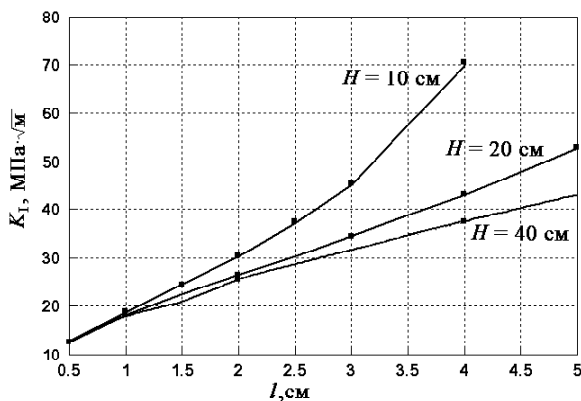


Рис. 2. Зміна КІН від глибини підповерхневої тріщини в пластині при розтягненні: II – МСЕ; €% – [3]

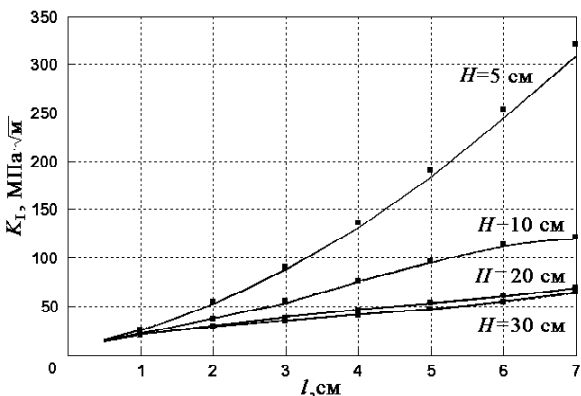


Рис. 3. Зміна КІН від глибини симетрично розташованих поверхневих тріщин в пластині при розтягненні: II – МСЕ; €% – [3]

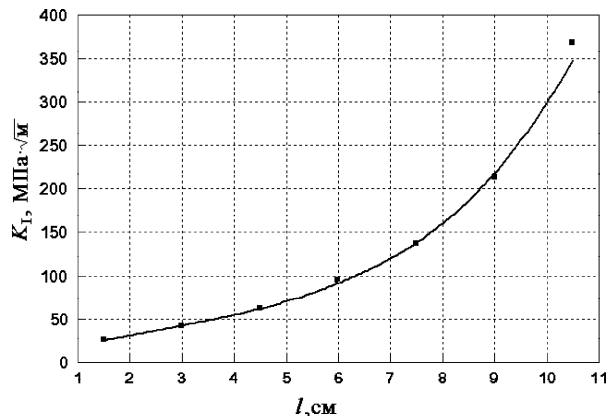


Рис. 4. Зміна КІН від глибини поверхневої тріщини в пластині при розтягненні: II – МСЕ; €% – [3]

Таблиця 1

Пластина шириною $H = 20$ см і довжиною $H = 20$ см при розтягненні при наявності підповерхневої тріщини

l, см	Тип скінченноелементної сітки								[3]
	рівномірна				нерівномірна				
	min CE 0,1 см		min CE 0,01 см		min CE 0,01 см		min CE 0,001 см		
	3 CE	4 CE	3 CE	4 CE	3 CE	4 CE	3 CE	4 CE	
1	18,63	18,91	17,84	17,82	18,03	18,25	17,91	17,95	17,97
2	26,77	26,97	26,18	26,13	26,5	26,67	26,44	26,48	26,45
3	34,52	34,68	34,09	34,06	34,48	34,63	30,42	30,46	34,49
4	42,92	42,98	42,59	42,48	43,03	43,17	43,06	43,11	43,11
5	52,38	52,35	52,2	52,05	52,7	52,82	52,79	52,85	52,87

Для всіх варіантів виконані числові дослідження при густіших скінченноелементних сітках: рівномірній сітці при мінімальному скінченному елементі у вершині тріщини – квадраті зі стороною $0,1$ см і $0,01$ см, нерівномірній сітці з коефіцієнтом згущення до вершини тріщини 2 при мінімальному скінченному елементі у вершині тріщини – квадраті зі стороною $0,001$ см. Співставлення результатів, отриманих на різних скінченноелементних сітках для першого варіанту пластини, приводяться в табл. 1. В останньому стовбці наводяться дані [3].

Похибка отриманих значень при рівномірній дискретизації не перевищує 5% (мінімальний CE $0,1$ см) і $1,6\%$ (мінімальний CE $0,01$ см), при нерівномірній – $1,6\%$ (мінімальний CE $0,01$ см) і $2,9\%$ (мінімальний CE $0,001$ см). Аналогічні результати отримані й для інших випадків.

Можна зробити висновок, що для розглянутих задач рівномірна дискретизація з мінімальним CE $0,1$ см є достатньо розрідженою та призводить до значних відхилень від точного результату (похибка змінюється від $0,1$ до $14,8\%$). Рівномірна дискретизація з мінімальним CE $0,01$ см приводить до точніших результатів (від $0,2$ до $2,9\%$), нерівномірна дискретизація забезпечує достатню точність результатів (від $0,03$ до 5% при мінімальному CE $0,01$ см і від $0,05$ до 6% при мінімальному CE $0,001$ см). З отриманих результатів слідує, що густіша

Таблиця 2

Пластина шириною $H = 15$ см і довжиною $2H = 30$ см при розтягненні при наявності поверхневої тріщини, нахиленої під кутом 135°

l, см	Тип скінченноелементної сітки									[3]		
	рівномірна			нерівномірна								
	min CE 0,01 см			min CE 0,01 см			min CE 0,001 см					
	K_I	K_{II}	K_e	K_I	K_{II}	K_e	K_I	K_{II}	K_e			
1,5	16	7,9	19,5	15,9	8,1	19,6	15,4	8	19,1	14,3	8,4	18,6
10,5	115,5	39,4	128,2	115,6	40,1	128,8	113,6	40,2	127	109,19	41,9	124,2

скінченноелементна сітка не приводить до суттєвого підвищення точності отриманих значень.

При орієнтації тріщини під кутом 135° (рис. 1,г) за ріст тріщини відповідає КІН нормального відриву K_I та КІН поперечного зсуву K_{II} . В цьому випадку для оцінки кінетики використовується еквівалентний КІН K_e , що визначається за формулою (1).

У табл. 2 наводяться результати обчислення КІН при різних глибинах тріщини та різних типах скінченноелементної сітки. В останньому стовбці наводяться значення КІН, що отримані з [3].

Похибка отриманих результатів складає для K_I – від 4,1 до 11,8 %, а для K_{II} – від 3,5 до 6 % (див. табл. 2). Однак при дослідженні живучості використовується еквівалентне значення КІН K_e , похибка якого складає від 1,6 до 4,8 % (див. табл. 2), що припустимо для інженерних розрахунків.

Результати дослідження живучості замкових з'єднань лопаток з диском газотурбінної установки ГТК-10-4 за наявності тріщини у диску [14] порівнюються з даними, опублікованих натурних спостережень ВАТ «НПО ЦКТИ» [17 – 19].

На практиці частіше виявляють тріщини в зоні верхнього зуба замкового з'єднання (рис. 5).

Розрахунки показують, що верхні зуби з'єднання підвантажені більше, ніж інші зуби на 38 %, навіть в ідеально виготовленому з'єднанні (рис. 6). Це пояснюється більшим температурним розширенням лопатки ніж диска, а також перевищенням на 20°C температури хвостовика лопатки від гребеня диска (рис. 7). Внесок підвантаження верхнього зуба від різності коефіцієнтів лінійного температурного розширення в чотири рази вищий, ніж від підвищення температури хвостовика. Тому при перегріві замкового з'єднання здійснюється подальше підвантаження верхнього зуба.

Натурні дослідження [17 – 19] показують, що перегрів значно впливає на час зародження та швидкість підростання тріщини, тому що визначальну роль у цьому відіграє повзучість. Серед обстежених у 22 % нормально працюючих установок були виявлені тріщини, а в проблемних – до 60 % [17, 18].

Спостерігалися випадки, коли тріщина проростала наскрізь. Виходячи з розкиду терміну експлуатації обстежених установок, час росту тріщин не пов'язується з напрацюванням, а залежить від різноманітних факторів

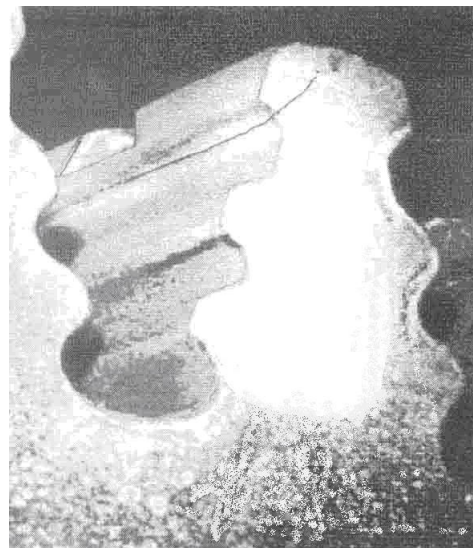


Рис. 5. Розташування тріщини в верхньому зубі гребеня диска ГТК-10-4

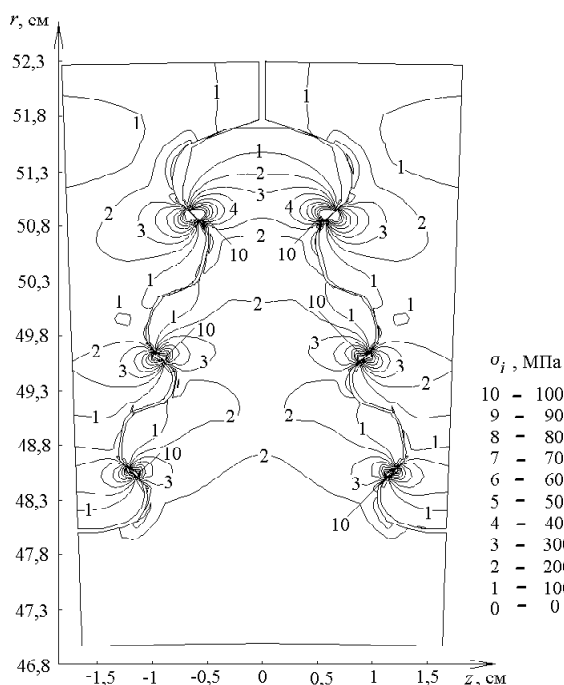


Рис. 6. Розподіл інтенсивності напружень в замковому з'єднанні у випадку його ідеального виготовлення

(виготовлення й режиму експлуатації). Очевидно, що невелика кількість тріщин на диску, з'являється в найбільше навантажених зубах, де основний внесок дає неточність виготовлення (перегрів впливає однаково на всі гребні).

Найбільшу кількість тріщин виявлено в дисках з напрацюванням приблизно 100 тис. годин, однак у деяких перегрітих дисках були тріщини й після 3 тис. годин. Час росту тріщини в нормально працюючих установках значно менший 100 тис. годин (орієнтовно – 10 – 20 тис. годин).

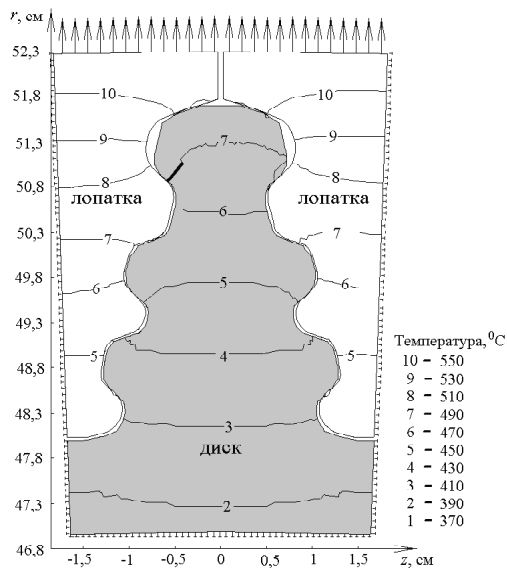


Рис. 7. Розрахункова схема замкового з'єднання та розподіл температур

З розрахунків слідє, що внаслідок неточності виготовлення в рамках допусків та підвищення температури верхній зуб гребня диска може значно підвантажуватися, а перегрів обода призводить до розвитку тріщини. Розрахунки показали, що КІН не досягає свого критичного значення (в'язкості руйнування) й тріщина проростає наскрізь.

Розрахунковий час росту тріщини узгоджується з тим, що спостерігається в дисках, де неточність виготовлення не перевищувала норму.

Таким чином, у статті показана відповідність результатів розрахунку для пластин з наведеними в літературі [3]. Результати розрахункового оцінювання живучості замкових з'єднань лопаток з диском якісно та кількісно погоджуються з даними натурних спостережень, що наводяться в літературі [17 – 19].

Автори висловлюють вдячність докт. техн. наук, проф. І. В. Орияку за зауваження та пропозиції до роботи.

Література

1. *Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса*: РД 34.17.440-96. – М.: АООТ “ВТИ”, 1996. – 153 с.
2. *Прочность материалов и конструкций* / Ред. кол.: В.Т. Троценко (отв. ред.) и др. – К.: Академперіодика, 2005. – 1008 с.
3. *Саврук М.П.* Механика разрушения и прочность материалов. В 4 т. Т. 2. Коэффициенты интенсивности напряжений в теле с трещинами. – Киев: Наукова думка, 1988. – 620 с.
4. *Механика разрушения и прочность материалов*. В 4 т. Т.4. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Под. ред. В.В. Панасюка. – К.: Наук. думка, 1990. – 680 с.

5. *Броек Д.* Основы механики разрушения. – М.: Высш. шк., 1980. – 368 с.

6. *Черепанов Г.П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

7. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений* / Под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с.

8. *Троценко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В. и др.* Сопротивление материалов деформированию и разрушению: справочное пособие. Ч. 1. – К.: Наук. думка, 1993. – 288 с.

9. *Орияк И.В., Яковлева Е.С., Розгонюк В.В.* Применение метода Чжена и Финни для расчётов коэффициентов интенсивности напряжений в тонкостенных трубах с длинными осевыми трещинами с учетом геометрической нелинейности // Пробл. прочности. – 2007. – № 7. – С. 5 – 18.

10. *Орияк И.В., Радченко С.А.* Анализ стабильного роста трещины на основе двухкритериального подхода // Пробл. прочности. – 2001. – № 6. – С. 41 – 60.

11. *Овчинников А.В.* Интерполяционный метод расчёта коэффициентов интенсивности напряжений // Пробл. прочности. – 1988. – № 6. – С. 9 – 15.

12. *Правила составления расчётных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами*: МР 125-02-95. – М.: ЦНИИТМАШ, 1995. – 52 с.

13. *Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Мележик И.И.* Расчёт трещиностойкости элементов конструкций методом конечных элементов // Вестник НТУ “ХПИ”. Динамика и прочность машин. – 2005. – Вып. № 21. – С. 127 – 132.

14. *Шульженко Н.Г., Гонтаровский П.П., Мележик И.И.* Расчетная оценка трещиностойкости элементов роторов турбомашин // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 3. – С. 58–63.

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

16. *Лебедев А.О., Бобир М.И., Ламашевский В.П.* Механика материалов для инженеров. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2006. – 288 с.

17. *Крюков И.И., Рыбников А.И., Платонов В.С. и др.* Диагностика трещин, образующихся в процессе эксплуатации в ёлочных пазах дисков газовых турбин ГТК-10 и ГТ-750-6 методами неразрушающего контроля // Труды ЦКТИ. – 2009. – Вып. 296. – С. 261 – 272.

18. *Рыбников А.И., Калинин Н.А., Леонтьев и др.* Проблемы продления ресурса газовых турбин ГТК-10 и ГТ-750-6 с наработкой более 170 тыс. ч // Труды ЦКТИ. – Вып. 295. – 2006. – С. 143 – 153.

19. *Дашунин Н.В., Рыбников А.И., Гецов Л.Б. и др.* Опыт длительной эксплуатации стационарных ГТУ на магистральных газопроводах. Ч. 1. Анализ характерных повреждений деталей // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 50 – 55.

Отримана 11.11.10

M. Shulzhenko, P. Gontarovskiy, I. Melezhyk
Comparison of calculation results of survivability parameters of engineering industry elements with data of the published researches

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

On the basis of comparison of literary data with survivability results of elements with the cracks, gained by the technique developed earlier, the estimation of their conformity is carried out. Values of stress intensity factors in a crack tip in strips under extension were defined by the FEM and compared to the published analytical solutions. Results of crack kinetics estimation in gas-turbine plant lock joint with the published data of natural observations were compared. The satisfactory coordination of compared results is gained.