

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗВИТКУ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРІЩИН В ТІЛАХ ОБЕРТАННЯ СКЛАДНОЇ СТРУКТУРИ З УРАХУВАННЯМ ФОРМОЗМІНЕННЯ

В.А. Баженов,

докт. техн. наук, професор

Ю.В. Максим'юк,

канд. техн. наук, доцент

*Київський національний університет будівництва і архітектури
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, Україна. 03680*DOI: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2018.101.111-120>

Розроблено і апробовано на тестових прикладах покроковий алгоритм визначення траєкторії розвитку початкової кільцевої тріщини в тілах обертання складної структури МСЕ. Достовірність результатів визначення траєкторії розвитку початкової тріщини обґрунтовано шляхом розв'язку контрольних прикладів. Наведений результат розрахунку відповідального об'єкта сучасної техніки.

Ключові слова: тріщиностійкість, формозмінення, тіла обертання, модифікований метод реакцій, лінійні і нелінійні параметри механіки руйнування, з'єднувальний вузол занурюваного контейнера, стопорний клапан парової турбіни.

Вступ. Визначення параметрів локального руйнування для тріщин, є важливою, але частковою задачею механіки руйнування. На практиці частіше зустрічаються випадки, коли відома незначна початкова тріщина невеликої довжини і необхідно визначити умови руйнування конструкції, тобто критичну довжину тріщини при заданому навантаженні. При цьому, від правильності обчислення траєкторії розвитку тріщини значною мірою залежить достовірність усього розрахунку, оскільки обчислення параметрів руйнування вздовж траєкторії, не співпадаючи з реальною, може привести до невірної оцінки несучої здатності конструкції в цілому.

Слід відзначити, що моделюванню розвитку тріщини за допомогою МСЕ присвячена незначна кількість робіт [3]. Ефективність методики в цьому випадку значною мірою залежить від ефективності скінченно елементної бази і методів визначення параметрів механіки руйнування. В даній роботі за основу прийнята орієнтація на використання універсальних СЕ [7], що дозволяє оптимізувати дискретні моделі методу скінченних елементів (МСЕ) при розрахунку тіл складної структури. Визначення параметрів механіки руйнування реалізується модифікованим методом реакцій, ефективність якого при змішаному руйнуванні продемонстрована в роботах [2, 6].

1. Алгоритм визначення траєкторії магістральної тріщини на основі модифікованого методу реакцій. Для визначення траєкторії розвитку початкової тріщини на основі МСЕ використовується покроковий алгоритм (рис. 1).

В цьому випадку на кожному кроці прирощення довжини тріщини обчислюються значення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) K_I і K_{II} , які дозволяють отримати напрямок розвитку тріщини:

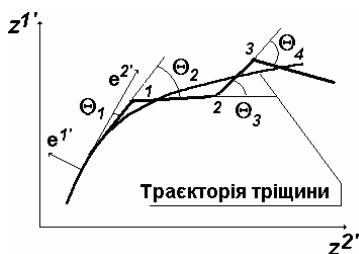


Рис. 1

$$\Theta_i = f(K_{Ii}, K_{IIi}). \quad (1)$$

Вважаючи далі, що тріщина подовжиться вздовж отриманого напрямку на деякий відрізок Δl , одержимо точку 1, що несуттєво відхилилася від дійсної траєкторії, внаслідок того, що подовження відбулося не по дійсній траєкторії, а по дотичній до неї. Обчисливши для точки 1 КІН K_I і K_{II} і, використовую-

ючи умову (1), визначимо новий кут Θ_2 , що поверне траєкторію таким чином, щоб наблизити її до дійсної. Повторюючи дану операцію n разів, одержимо ламану траєкторію розвитку тріщини, що обумовлено використанням покрокового алгоритму, який ґрунтується на відповідних диференціальних залежностях розвитку тріщини. Для одержання дійсної траєкторії проводиться згладжування отриманої. При зміні кроку Δl можна знайти таке його мінімальне значення, подальше зменшення якого не призведе до зміни одержуваної траєкторії. Оскільки отримана траєкторія має вигляд ламаної лінії, то після її вирівнювання варто провести K -тарировку (обчислення значень КІН уздовж траєкторії тріщини) [1, 4].

Відповідно до критерію локального руйнування, запропонованого Ердоганом і Сі в статті [9], розвиток тріщини при несиметричному навантаженні відбувається в напрямку, перпендикулярному дії максимальних розтягуючих напружень. Розподілення напружень при вершині гострої тріщини в цьому випадку можна визначити за формулами:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right), \\ \tau_{r\theta} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} (K_I \sin \theta + K_{II} \cos \theta). \end{aligned} \quad (2)$$

Напрямок поширення тріщини можна визначити, використовуючи умову $\partial \sigma_\theta / \partial \theta = 0$ або $\tau_{r\theta} = 0$, звідки одержати рівняння для визначення Θ_i :

$$K_I \sin \Theta_i + K_{II} (3 \cos \Theta_i - 1) = 0. \quad (3)$$

Вираз (1) в цьому випадку матиме вигляд:

$$\Theta_i = 2 \arctg \left(\frac{1 - \sqrt{1 + 8\lambda_K^2}}{4\lambda_K} \right), \quad (4)$$

де $\lambda_K = K_{II} / K_I$.

2. Достовірність результатів визначення траєкторії магістральних тріщин. На першому етапі розглянемо задачу про визначення прямолінійної траєкторії розвитку похилої початкової тріщини в пластині, що знаходиться під дією одновісного розтягу (рис. 2).

На рис. 3. наведені траєкторії розвитку похилої тріщини в системі координат $y^{i''}$, отримані шляхом розрахунку ([8], суцільна лінія 1), експериментально ([5], суцільна лінія 2), а також отримані за описаною методикою (штрих пунктирна лінія). Обчислена на основі алгоритму 1 траєкторія добре узгоджується з експериментальними і розрахунковими результатами інших авторів.

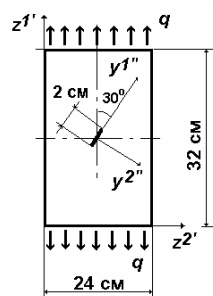


Рис. 2

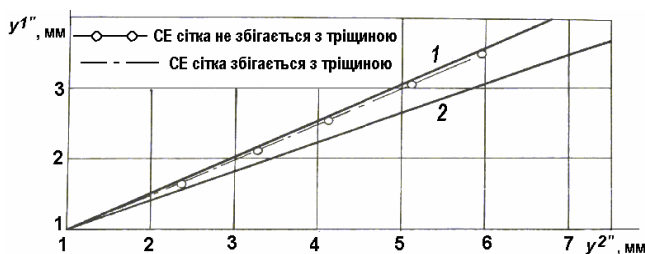


Рис. 3

На другому етапі була досліджена точність визначення КІН K_I і K_{II} вздовж отриманої траєкторії розвитку тріщини. На рис. 4 наведена залежність K_I і K_{II} від відношення проєкції тріщини на вісь $z^{2'}$ до ширини пластини. Наведені величини K_I і K_{II} визначені за формулами:

$$\tilde{K}_I = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{\pi a}}, \quad \tilde{K}_{II} = \frac{K_{II}}{\sigma\sqrt{\pi a}}, \quad (5)$$

де σ – розтягуюче навантаження, a – проєкція тріщини на вісь $z^{2'}$.

Суцільною лінією на графіку показані результати, що отримані в роботі [5], кружками – дані роботи [8], штрихпунктиром – поправка Ізіді (значення K_I для обмеженої пластини з горизонтальною тріщиною), пунктиром – значення K_I і K_{II} , отримані із використанням модифікованого методу реакцій. Отже, розподілення $\tilde{K}_I$, добре узгоджується з наведеними розв'язками з похибкою в межах 5%. Але отримані значення є дещо ближчими до значень графіку $\tilde{K}_I$ для пластини з горизонтальною тріщиною (поправка Ізіді). Відхилення даних, викладених в роботі [5], від поправки Ізіді спостерігається при відношенні $a/\delta > 0,2$, де, навпаки, узгодження повинно було б бути кращим. Це обумовлено тим, що тріщина під час

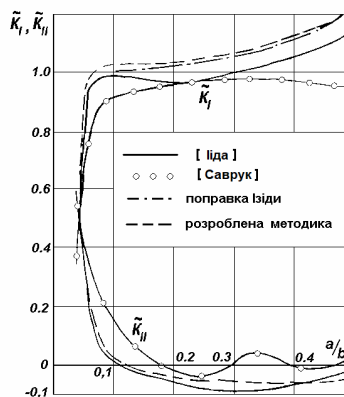


Рис. 4

зростання прямує до розташування, перпендикулярного до дії розтягуючого навантаження, довжина тріщини наближується до розміру її проекції на вісь z^2 , а конфігурація – до горизонтальної тріщини.

Отже, розроблені підходи до розв'язання задач механіки руйнування дозволяють з високим ступенем точності визначати параметри механіки руйнування та проводити визначення траєкторії криволінійних тріщин.

3. Визначення характеру руйнування і несучої здатності з'єднувального вузла занурюваного контейнеру. Прогнозування несучої здатності високо напружених об'єктів із матеріалів типу скла є складною задачею. Основні труднощі, які стоять на шляху її розв'язання, пов'язані з високою крихкістю скляних елементів комбінованих конструкцій, до яких відносяться занурювані контейнери для дослідження морських глибин. Враховуючи відсутність пластичних деформацій в склоелементах, їх низьку міцність на розтяг і високу чутливість до концентраторів напружень, отримує особливе значення коректне обчислення критичних навантажень. Це призводить до необхідності більш детального розгляду характеру розподілення і рівня напружень, а також процесу розвитку магістральних тріщин, оскільки основною вимогою при експлуатації контейнерів є забезпечення їх герметичності.

В якості об'єкта складної структури розглянуто конструкцію занурюваного контейнера, розрахункова схема якого з розбивкою на фрагменти і одним з варіантів дискретної моделі представлена на рис. 5.

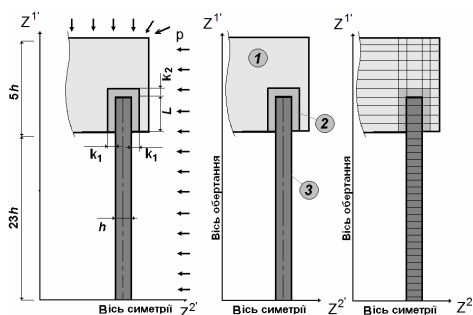


Рис. 5

Конструктивні параметри з'єднання такі: глибина затиснення скляної оболонки в металеву кришку $L=3h$, товщина бічних прошарків $k1=0,25h$, товщина прошарку на торці $k2=0,25h$, де $h=1$ см - товщина оболонки. Передбачалося, що механічні властивості елементів з'єднання характеризуються такими даними: модуль пружності кришки -

$E=2,1 \cdot 10^5$ МПа, прошарків - $E=0,035 \cdot 10^5$ МПа, оболонки - $E=0,8 \cdot 10^5$ МПа, коефіцієнти Пуассона кришки - $\nu=0,3$, прошарків - $\nu=0,34$, оболонки - $\nu=0,22$.

Елементи з'єднання, включаючи матеріал опорного прошарку, володіють різними механічними характеристиками. Розрахунок проводився в припущенні ідеальної пружності всіх складових частин з'єднання і відсутності взаємного зміщення сполучених деталей на поверхнях розділу. Оскільки міцність з'єднання в даному випадку цілком визначається міцністю елемента з крихкого матеріалу, руйнування якого починається зазвичай з поверхні, основну увагу було приділено вивченню напружень на бічних поверхнях скляної циліндричної оболонки.

На першому етапі проведено визначення загального напруженого стану циліндричної оболонки. результати представлені на рис. 6, де показане

розподілення кільцевих σ_θ^3 і осевих σ_z^3 напружень на зовнішній поверхні оболонки та на внутрішній поверхні σ_θ^B , σ_θ^B . Їх аналіз показує, що зона розтягуючих напружень локалізується в межах з'єднувального вузла контейнера.

Наявність розтягуючих напружень і, відповідно, можливість виникнення та наступного

розвитку тріщини в процесі експлуатації об'єкта призводить до необхідності оцінки його несучої здатності з позицій механіки руйнування.

Початкова тріщина (рис. 7 (б)) розташована на відстані $0,3h$ від краю заглибки у точці досягнення максимальних розтягуючих напружень, розмір тріщини заданий відповідно до відомих реально існуючих дефектів на поверхні подібних скляних об'єктів. Кут відхилення її від нормалі до зовнішньої поверхні оболонки у бік торця прийнятий таким, що дорівнює 8° і є перпендикулярним напрямку максимальних головних напружень в цій області.

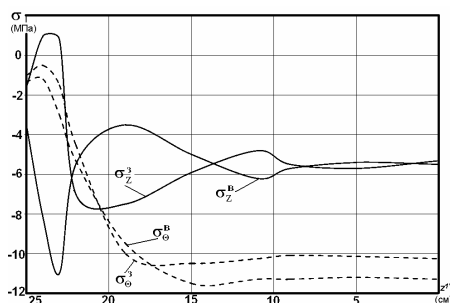
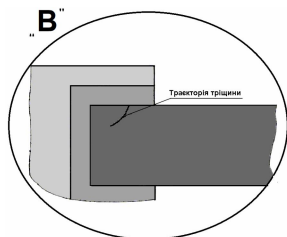
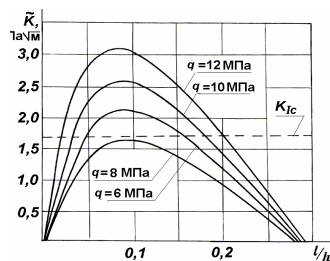


Рис. 6



(а)



(б)

Рис. 7

На рис. 7 (а) наведена траєкторія тріщини, обчислена відповідно підходу, викладеного вище, характерною особливістю якої є її розвиток тріщини вглиб з'єднувального вузла.

Графіки залежності приведених величин КІН $\tilde{K}(l)$ від довжини тріщини при різній інтенсивності зовнішнього навантаження зображені суцільними лініями на рис. 7 (б).

Пунктирною лінією показане значення критичного коефіцієнта інтенсивності напружень K_{Ic} , що для скла, з якого виготовлений циліндр, дорівнює $1,7 \text{ МПа м}^{1/2}$. Аналізуючи результати, можна сказати, що навантаження 6 МПа не призведе до розвитку початкової тріщини $l_0 = 0,05h$. Для більш високих значень зовнішнього тиску критична довжина початкової тріщини буде зменшуватися від $0,05h$ ($q = 8 \text{ МПа}$) до $0,02h$ ($q = 12 \text{ МПа}$).

Отже, при інтенсивності зовнішнього тиску, що змінюється в межах до 12 МПа, статичне збільшення тріщини можливо лише до досягнення довжини $l = 0,2 h$, де $\tilde{K}$ знову стає менше ніж K_{lc} . Траєкторія тріщини при цьому має такий вигляд, що навіть при її подальшому розвитку не повинне відбуватися порушення герметичності з'єднання і катастрофічне руйнування об'єкта. Після досягнення довжини $0,3 h$, тріщина попадає в зону, де значення $\tilde{K}$ знижується до нуля, і подальший її розвиток стає неможливим.

4. Визначення ресурсу корпусу стопорного клапана з урахуванням формозміння. Для підтвердження вище сказаного було проведено розрахункове дослідження напружено-деформованого стану і умов руйнування корпусу стопорного клапана турбіни на стадії розвитку початкової тріщини з метою оцінки несучої здатності корпусних деталей турбіни при дії стаціонарних і пускових навантажень.

Оскільки на запорі клапана напруження максимальні, то саме це місце є найбільш вірогідним для виникнення і розвитку тріщини [100].

Для визначення критичної довжини тріщини, наявність якої призведе до лавиноподібного руйнування корпусу клапана, були обчислені КІН K_I і K_{II} вздовж траєкторії тріщини від дії внутрішнього тиску, що виникає в екстремальних умовах. Для окремих точок траєкторії тріщини побудовані деформовані схеми (рис. 8).

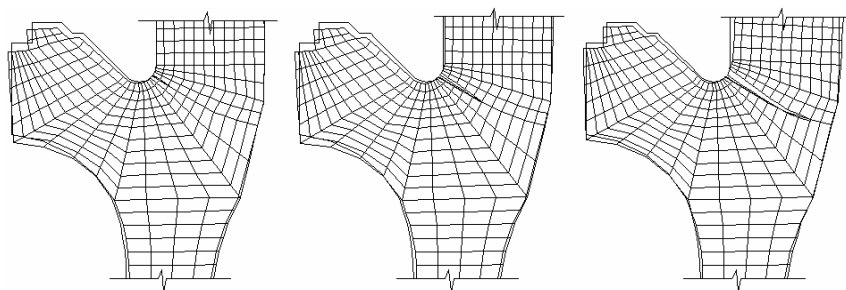


Рис. 8

Результати визначення впливу геометричної нелінійності на величину ресурсу корпусу стопорного клапана парової турбіни при наявності в ньому магістральної тріщини критичної довжини, зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Геометрично лінійний розв'язок									
l/h	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
$l_{\text{серед}}/h$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	
$\tilde{K}$	21.70	23.00	23.50	24.00	24.70	25.43	27.10	29.70	
$\Delta N \cdot 10^5$	1.96	1.57	1.44	1.33	1.19	1.07	0.837	0.589	
$\Sigma(N \cdot 10^5)$	0	1.96	3.53	4.97	6.31	7.50	8.57	9.40	9.99
Геометрично нелінійний розв'язок									
l/h	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85
$l_{\text{серед}}/h$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	

Продовження Табл. 1								
$\tilde{K}$	21.03	22.29	22.77	23.25	23.93	24.63	26.18	28.70
$\Delta N \cdot 10^5$	2.21	1.77	1.63	1.50	1.35	1.21	0.955	0.672
$\Sigma(N \cdot 10^5)$	0	2.21	3.98	5.61	7.11	8.46	9.67	11.30

Врахування формозмінення показало, що зменшення коефіцієнтів інтенсивності на 2-3% в межах критичної довжини тріщини призводить до збільшення ресурсу більш ніж на 12%.

Висновок. В даній роботі отримані розв'язки нових прикладних задач будівельної механіки про вплив формозмінення на величину ресурсу і тріщиностійкості конструктивних елементів машинобудівної промисловості. Виявлено, що незважаючи на відносно незначні зміни параметрів пружно-деформованого стану величина ресурсу збільшилася для стопорного клапана порівняно з геометрично лінійним розрахунком, що має суттєве значення для визначення терміну експлуатації цього об'єкту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А.* Матрица жесткости и вектор узловых реакций скінченного элемента для розв'язання просторових задач термов'язкопружнопластичності НМСЕ / В.А. Баженов, С.О. Пискунов, І.І. Солодей та ін. // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник / – К.:КНУБА, 2005. – Вип. 76. – С. 3–26.
2. *Баженов В. А.* Решение линейных и нелинейных пространственных задач механики разрушения на основе полуаналитического метода конечных элементов / Баженов В. А., Гулярь А. И., Пискунов С. О. [и др.]: Сообщение 1. Теоретические основы и исследование эффективности конечно-элементной методики решения пространственных задач механики разрушения // Проблемы прочности. – 2011. – Вип. 1. – С. 27-39; Сообщение 2. Методика определения инвариантного J-интеграла в дискретных моделях МКЭ. // Проблемы прочности. – 2011. Вип. 2. – С. 17-32.
3. *Баженов В.А.* Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах руйнування просторових тіл : Монографія / В. А. Баженов, О. І. Гулярь, С. О. Пискунов, О. С. Сахаров – К. : КНУБА, 2005. – 298 с.
4. *Гулярь А.И.* Реализация метода податливости на основе МКЭ для сеток, не совпадающих с траекторией трещины / А.И. Гулярь, Т.А. Кушниренко, А.С. Сахаров // Сопротивление материалов и теория сооружений. – 1981. – Вип.38. – С.42–46.
5. *Иида С.* Скорость распространения трещин в пластинах из сплава 7075-T6 при циклическом растяжении и поперечном сдвиге / С. Иида, А. Кобаяси // Тр. Амер. об-ва инженеров-механиков. Сер. Д. – 1969. – № 4. – С. 210–214.
6. *Максим'юк Ю.В.* Визначення тріщиностійкості віссиметричних тіл з урахуванням формозмінення / Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник / –К.:КНУБА, 2018. –Вип.100. – С. 202-213.
7. *Максим'юк Ю.В.* Розрахункові співвідношення універсального скінченного елемента на основі моментної схеми скінчених елементів / Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-техн. збірник / –К.:КНУБА, 2015. – Вип.94. – С. 244-251.
8. *Саврук М. П.* О расчете статической траектории распространения трещин / М. П. Саврук, П. Н. Осив // Проблемы прочности. – 1982. – №11. – С. 19–23.
9. *Эрдоган Ф.* О распространении трещин в пластинках под действием нагрузки в плоскости и поперечного сдвига / Ф. Эрдоган, Дж. Си // Труды амер. об-ва инж.-мех. Сер. Д. – 1963. – Т. 85. – № 4. – С. 122–126.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A.* Matrytsia zhorstkosti i vektor vuzlovyykh reaktsii skinchennoho elementa dlia rozv'iazannia prostorovykh zadach termov'язкопружнопластичності NMSE (Rigidity matrix and vector of knot reactions of a finite element for solving spatial problems of thermally elastic plasticity of NMVOC) / V.A. Bazhenov, S.O. Pyskunov, I.I. Solodei ta in. // Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk–K.:KNUBA, 2005. – Vyp. 76. – S. 3–26.

2. *Bazhenov V.A.* Reshenye lyneinykh y nelyneinykh prostranstvennykh zadach mekhaniky razrusheniya na osnove poluanalytycheskogo metoda konechnykh elementov / Bazhenov V. A., Huliari A.Y., Pyskunov S.O. [y dr.]: Soobshchenye 1. Teoreticheskiye osnovy y yssledovaniye effektivnosti konechno-elementnoi metody resheniya prostranstvennykh zadach mekhaniky razrusheniya (Solution of linear and nonlinear spatial problems of fracture mechanics based on the semi-analytical finite element method. Report 1. Theoretical foundations and investigation of the effectiveness of the finite-element method solving spatial problems of fracture mechanics) // Problemy prochnosti. – 2011. – Vyp. 1. – S. 27–39; Soobshchenye 2. Metodyka opredeleniya unvaryantnogo J-yntehrala v dyskretnykh modeliakh MKЭ (Message 2. Method of determining the invariant J-integral in discrete models of the FEM) // Problemy prochnosti. 2011. Vyp. 2. – S. 17–32.
3. *Bazhenov V.A.* Napivanalitichnyi metod skinchennykh elementiv v zadachakh ruinovannya prostorovykh til: Monohrafiia (The napalanal method of skynchnykh elementov in problems ruinovnya prostorovykh til: Monograph) / V.A. Bazhenov, O.I. Huliari, S.O. Pyskunov, O.S. Sakharov – K.: KNUBA, 2005. – 298 s.
4. *Huliari A.Y.* Realizatsiya metoda podatlyvosti na osnove МКЭ dlia setok, ne sovpadaiushchykh s traektoriei treshchyny (Implementation of the method of compliance on the basis of FEM for grids that do not coincide with the crack trajectory) / A.Y. Huliari, T.A. Kushnyrenko, A.S. Sakharov // Soprotivleniye materialov y teoriya sooruzheniy. – 1981. – Выр.38. – S.42–46.
5. *Yda S.* Skorost rasprostraneniya treshchyn v plastynakh yz splava 7075-T6 pry tsyklycheskom rastiazhenii y poperechnom sdvyhe (The rate of propagation of cracks in the plates of alloy 7075-T6 under cyclic tension and transverse shear) / S. Yda, A. Kobaiasy // Tr. Amer. ob-va ynzherov-mekhanikov. Ser. D. – 1969. – № 4. – S. 210–214.
6. *Maksimyuk Yu.V.* Vyznachennia trishchynostiikosti visesymetrychnykh til z urakhuvanniam formozminennia (Determination of the friction resistance of axisymmetric bodies, taking into account the shape change) / Yu.V. Maksimyuk // Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk / –K.:KNUBA, 2018. – Vyp.100. – S. 202–213.
7. *Maksimyuk Yu.V.* Rozrakhunkovi spivvidnoshennia universalnoho skinchenoho elementa na osnovi momentnoi skhemy skinchennykh elementiv (Calculated ratios of a universal finite element based on a finite element timing scheme) / Yu.V. Maksimyuk // Opir materialiv i teoriia sporud: nauk.-tekhn. zbirnyk / –K.:KNUBA, 2015. – Vyp.94. – S. 244–251.
8. *Savruk M. P.* O raschete statycheskoi traektorii rasprostraneniya treshchyn (About the calculation of the static trajectory of crack propagation) / M.P. Savruk, P.N. Osyv // Problemy prochnosti. – 1982. – №11. – S. 19–23.
9. *Erdohan F.O.* rasprostraneniya treshchyn v plastynkakh pod deistviem nahruzky v ploskosty y poperechnoho sdvyha (On the propagation of cracks in the plates under the action of load in the plane and transverse shear) / F. Erdohan, Dzh. Sy // Trudy amer. ob-va ynz.-mekh. Ser. D. – 1963. – T. 85. – № 4. – S. 122–126.

Стаття надійшла до редакції 1.11.2018 р.

Bazhenov VA, Maksimuk Yu. V.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESSES OF DEVELOPMENT OF TRUNK CRACKS IN THE BODIES OF ROTATION OF THE COMPLEX STRUCTURE TAKING INTO ACCOUNT THE FORM-MODIFICATION

The step-by-step algorithm for determining of the trajectory of initial crack propagation in the bodies of rotation of the complex structure using FEM was developed and verified on the test examples. The result of calculation of the responsible object of modern technology are shown.

Determining of the fracture mechanics parameters is an important, but partial problem of fracture mechanics. In practice, there are cases when a small initial small crack is known and it is necessary to determine the destruction conditions of the structure - the critical length of the crack at a given load. At the same time, the correctness of determining of the trajectory of initial crack propagation depends largely on the reliability of the calculation of fracture mechanics parameters along the trajectory. If it is not coinciding with the real one, it can lead to an incorrect assessment of the bearing capacity of the structure as a whole.

It should be noted that a small number of papers are devoted to the modeling of the crack development using the FEM [3]. The effectiveness of the method in this case depends to a large extent on the effectiveness of the finite element base and the methods of determining of the fracture mechanics parameters. In this paper, the focus is on the use of universal finite element [7], which allows to optimize the FEM discrete model when calculating the bodies of a complex structure. Determination of the fracture mechanics parameters is realized by the modified method of reactions, the effectiveness of which in the case of mixed fracture is demonstrated in the works [2, 6].

In this paper, we arrived at solutions of the new structure mechanics problems about the effect of form-modification on the life-time value and the fracture resistance of the structural elements of modern industry. It has been found that despite relatively small changes in the values of stress-strained state parameters the life-time of the stop valve has increased compared with the geometric linear calculation, which is essential for determining of the lifetime of this object.

Keywords: crack resistance, shape change, body of rotation, modified reaction method, linear and nonlinear parameters of fracture mechanics, connecting node of immersion container, stop valve of steam turbine.

Баженов В.А., Максимук Ю.В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗВИТИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРЕЩИН В ТЕЛАХ ВРАЩЕНИЯ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ С УЧЕТОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

Разработан и апробирован на тестовых примерах пошаговый алгоритм определения траектории развития начальной трещины в телах вращения сложной структуры МКЭ. Приведен результат расчета ответственного объекта современной техники.

В данной работе получены решения новых прикладных задач строительной механики о влиянии формоизменения на величину ресурса и трещиностойкости конструктивных элементов современной техники. Выявлено, что несмотря на относительно незначительные изменения параметров напряженно-деформированного состояния величина расчетного ресурса стопорного клапана увеличилась по сравнению с геометрически линейным расчетом, что имеет существенное значение для определения срока эксплуатации этого объекта.

Ключевые слова: трещиностойкость, формоизменение, тела вращения, модифицированный метод реакций, линейные и нелинейные параметры механики разрушения, соединительный узел погружаемого контейнера, стопорный клапан паровой турбины.

УДК 539.3

Баженов В.А., Максим'юк Ю.В. **Математичне моделювання процесів розвитку магистральних тріщин в тілах обертання складної структури з урахуванням формозмінення** // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2018. – Вип. 101. – С. 111-120.

Розроблено і апробовано на тестових прикладах покроковий алгоритм визначення траєкторії розвитку початкової тріщини в тілах обертання складної структури МСЕ. Наведений результат розрахунку відповідального об'єкта сучасної техніки.

Табл. 1. Іл. 8. Бібліогр. 9 назв.

UDC 539.3

Bazhenov VA, Maximyuk Yu.V.

Mathematical modeling of the processes of development of trunk cracks in the bodies of rotation of the complex structure taking into account the form-modification // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2018. – Issue 101. – P. 111-120.

The step-by-step algorithm for determining of the trajectory of initial crack propagation in the bodies of rotation of the complex structure using FEM was developed and verified on the test examples. The result of calculation of the responsible object of modern technology are shown.

Tabl. 1. Fig. 8. Ref. 9.

УДК 539.3

Баженов В.А., Максимюк Ю.В.

Математическое моделирование процессов развития магистральных трещин в телах вращения сложной структуры с учетом формоизменения // Сопротивление материалов и теория сооружений: науч.-тех. сборн. – К.: КНУСА, 2018. - Вип. 101. - С. 111-120.

Разработан и апробирован на тестовых примерах пошаговый алгоритм определения траектории развития начальной трещины в телах вращения сложной структуры МКЭ. Приведен результат расчета ответственного объекта современной техники.

Табл. 1. Ил. 8. Библиогр. 9 назв.

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, академік Національної академії педагогічних наук України, директор НДІ будівельної механіки **БАЖЕНОВ Віктор Андрійович**

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, **БАЖЕНОВУ Віктору Андрійовичу**

Робочий тел.: +38(044) 245-48-29;

Мобільний тел.: +38(067) 111-22-33;

E-mail: vikabazh@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5802-9848>

Автор (вчена ступень, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник НДІ будівельної механіки КНУБА **МАКСИМ'ЮК Юрій Всеволодович**

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, **МАКСИМ'ЮКУ Юрію Всеволодовичу**

Робочий тел.: +38(044) 241-55-38;

Мобільний тел.: +38(067) 230-94-72;

E-mail: maximyuk@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>