

УДК 539.3

## ВИЗНАЧЕННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ТІЛ З УРАХУВАННЯМ ФОРМОЗМІНЕННЯ

Ю.В. Максим'юк,

канд. техн. наук, доцент

*Київський національний університет будівництва і архітектури  
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ, Україна. 03680*

В даній роботі проведено узагальнення модифікованого методу реакцій для обчислення лінійних і нелінійних параметрів механіки руйнування в змішаних задачах при розвитку під дією зовнішніх навантажень великих деформацій пластичності. Достовірність результатів обґрунтована шляхом розв'язання тестових прикладів і наведені результати розрахунку конкретних об'єктів.

**Ключові слова:** тріщиностійкість, формозмінення, вісесиметричні тіла, модифікований метод реакцій, лінійні і нелінійні параметри механіки руйнування, стопорний клапан парової турбіни, компактний зразок.

**Вступ.** Вихідні співвідношення, прийняті в даній роботі відповідають вимогам індиферентності, енергетичної сумісності і об'єктивності похідних при визначенні їх прирощень [7]. Скінченноелементна база включає просторові [5], оболонкові [1] і універсальні СЕ [8], що забезпечує можливість побудови оптимальних дискретних моделей вісесиметричних тіл складної структури. Крім того, цьому суттєво сприяє використання багато фрагментного підходу формування сіткових областей [2]. Зв'язок між напруженнями і деформаціями здійснюється в межах теорії пластичної течії [6]. В якості критеріїв механіки руйнування прийняті коефіцієнт інтенсивності напружень  $K$ ,  $J$ -інтеграл і прирощення енергії деформування пов'язаної з прирощенням довжини тріщини  $G$ .

Визначення  $K$  базується на усередненні значень напружень і переміщень по деякій під області, параметри якої дозволяють уникнути суттєвого зменшення розмірів СЕ в при вершинній області тріщини [10]. Обчислення  $G$  відбувається шляхом інтегрування прирощень енергії, як за мередіональним перетеном тіла обертання, так і за параметром навантаження при розв'язку задач пластичності кроковим методом [11].

Оскільки досить широке розповсюдження в науковій літературі і в ліцензійних програмних комплексах набуло використання в якості критерію  $J$ -інтеграл, його обчислення при розробці даного підходу було приділено досить значна увага. На першому етапі була реалізована загально прийнята процедура обчислення  $J$ -інтеграла через значення напружень і деформацій [3]. Проведені дослідження показали, що такий підхід не завжди забезпечує його індеферентність. Тому на другому етапі розроблено варіант реалізації на основі значень вузлових реакцій і переміщень [4], для якого теоретично доведено його інваріантність для дискретних моделей МСЕ. На наступному етапі запропонована і обґрунтована ефективність модифікованого метода реакцій [12], що дозволяє суттєво спростити процедуру програмної реалізації.

Мета роботи полягає в апробації згаданих вище трьох варіантів обчислення J-інтеграла при розв'язанні фізичної і геометричної задач і розрахунку тріщиностійкості вісесиметричних і плоско-деформованих тіл конкретних об'єктів.

### 1. Ефективність і достовірність модифікованого методу реакцій. 3

метою обґрунтування ефективності і достовірності використання модифікованого методу реакцій для обчислення J-інтеграла, в умовах плоскої деформації з урахуванням геометричної нелінійності, було розглянуто тестовий приклад про розтяг нескінченної пластини з тріщиною скінченної довжини  $2l=2\text{ см}$  (рис. 1(а)), дискретна модель якої наведена на рис. 1(б). Вихідні дані: розтягуюче зусилля  $q=100\text{ кг/см}^2$ ; модуль пружності  $E=10^n\text{ кг/см}^2$  змінюється в інтервалі значень показника ступеня  $n$  від 3 до 4, коефіцієнт Пуассона  $\nu=0.333$ .

Наведені на рис. 2 графіки дозволяють зробити висновок, що модифікований варіант  $J(1/2uR)$  і основний варіант методу реакцій  $J(\text{PuR})$  практично співпадають.

Для доведення високої ефективності модифікованого варіанту методу реакцій при розв'язанні задач з урахуванням фізичного та геометрично нелінійного деформування, було розглянуто тестовий приклад про деформування прямокутної пластини з боковою тріщиною рис. 3.

Матеріал об'єкту – сталь 12Х2МФА, фізико-механічні характеристики якої  $E=2.05 \times 10^5\text{ МПа}$ ,  $\nu=0.3$  [9]. Закон пластичного деформування має наступний вигляд:

$$\bar{\sigma}/\sigma_m = 1 + 0.645(\bar{\epsilon}_p)^{0.388}, \quad (1)$$

де  $\sigma_m = 637\text{ МПа}$  – межа текучості;  $\bar{\sigma}$  – інтенсивність нормальних напружень;  $\bar{\epsilon}_p$  – інтенсивність деформацій.

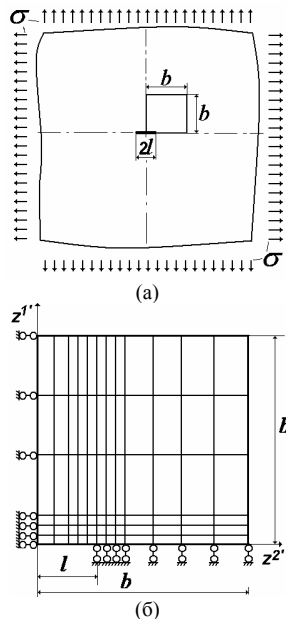


Рис. 1

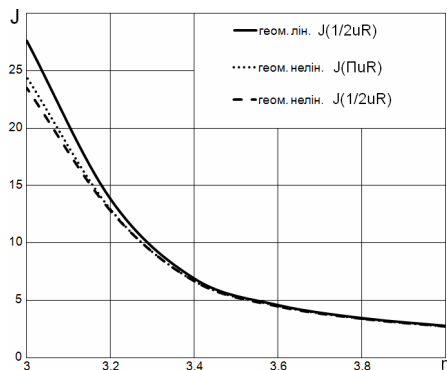


Рис. 2

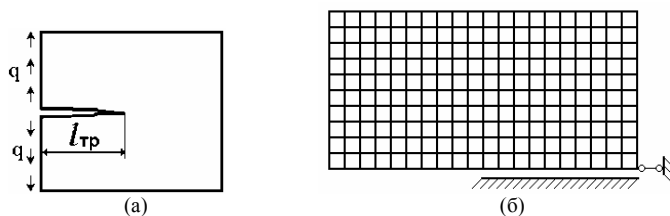


Рис. 3

Розвиток деформацій пластичності та залежності  $J$ -інтеграла при збільшенні навантаження показані на рис. 4(а) і 5(а) для плоскої деформації та на рис. 4(б) і 5(б) для плоско напруженого стану відповідно.

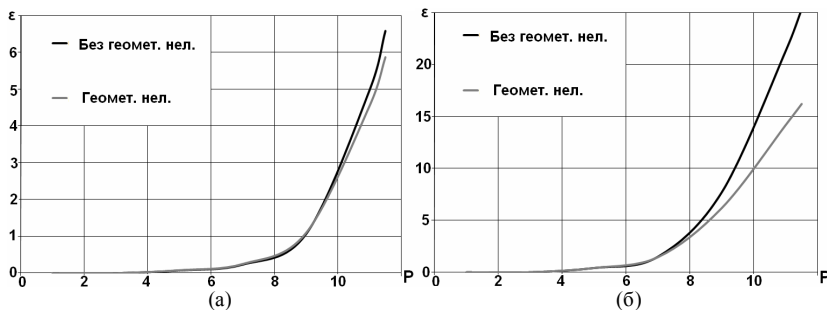


Рис. 4

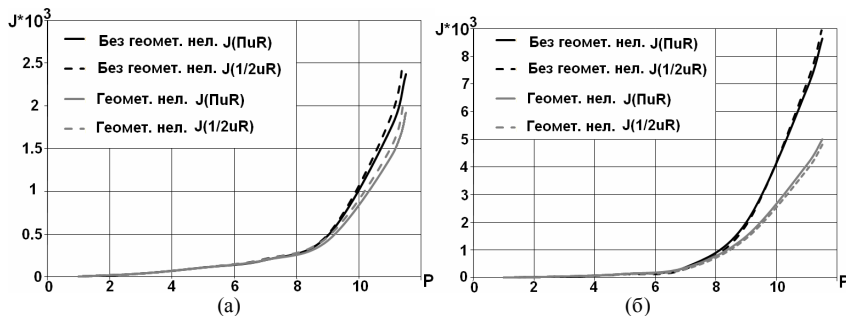


Рис. 5

Наведені результати показують, що як для плоско деформованого так і для плоско напруженого станів розв'язки задач в пружно-пластичній постановці отримані модифікованим методом реакцій, на рисунку позначені  $J(1/2uR)$  і основним методом реакцій, на рисунку позначені  $J(\Pi uR)$  практично збігаються між собою. Аналогічний результати отримані і у випадку урахування геометричної нелінійності.

Таким чином, проведене в даній роботі порівняння підходів до обчислення  $J$ -інтеграла в скінченноелементних задачах показало, що при використанні однакових дискретних моделей похибки обчислення контурного  $J$ -інтеграла за величинами напружень і градієнтів переміщень є меншими, ніж при використанні методів еквівалентного об'ємного інтегрування і методу похідної від жорсткості. Подання контурного  $J$ -

інтеграла через вузлові реакції і переміщення (модифікований метод реакцій) дозволяє зменшити ці похибки ще в два рази. Також модифікований метод реакцій може бути застосований для розрахунку тіл обертання та плоскодеформованих тіл в геометрично і фізично нелінійних задачах.

**2. Визначення величини ресурсу корпусу стопорного клапана з урахуванням геометричної нелінійності при дискретному руйнуванні.** Розроблена методика була використана при розрахунку корпусу стопорного клапану парової турбіни на рис. 6(a). Даний об'єкт представляє собою масивне тіло обертання складної форми.

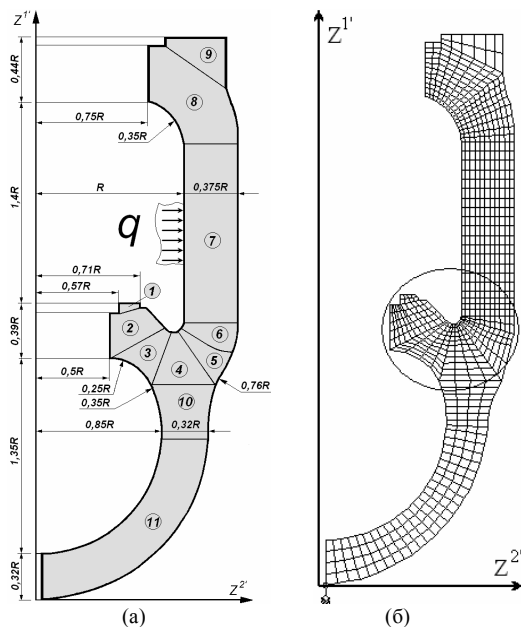


Рис. 6

В верхній частині – це циліндр, довжиною  $2R$ , товщиною  $0,375R$ , в нижній частині – півсфера, товщиною  $0,32R$ , і радіусом  $0,85R$ , де  $R$  – внутрішній радіус циліндра. Розрахункова схема з розбивкою на фрагменти приведена на рис. 6(a), де всі розміри представлені відносно до внутрішнього радіуса циліндра  $R$ . В верхній частині циліндра кріпиться кришка за допомогою болтів, рівномірно розмішених по колу. Перехідна частина від циліндра до сфери має виступ для запору стопорного клапана. Матеріал конструкції характеризується наступними механічними параметрами: коефіцієнт Пуассона  $\nu=0.3$ , модуль пружності  $E=205800 \text{ МПа}$ . В напрямку осі обертання геометричні і механічні характеристики не змінюється. Дискретна модель виконана без кришок стопорного клапана, які замінені на зосереджені сили, на виступі від клапана, і верхній частині циліндра від закладки кришки (рис. 6(б)). Навантаження представляє собою рівномірно розподілений тиск по внутрішній поверхні циліндричної частини коробки. Скінчено елемента модель виконана таким чином, щоб можна було згущувати сітку в

прогнозованому місці появи тріщини, використовуються СЕМ з кількістю невідомих 1712 і 6894.

Результати дослідження напружено-деформованого стану коробки стопорного клапана від внутрішнього тиску  $q=0,1$  МН/м<sup>2</sup> показані у вигляді графіків безрозмірної інтенсивності напружень, що розподіляються по галтелі забору клапана (рис. 7(a)), та вздовж радіусу циліндра (рис. 7(б)).

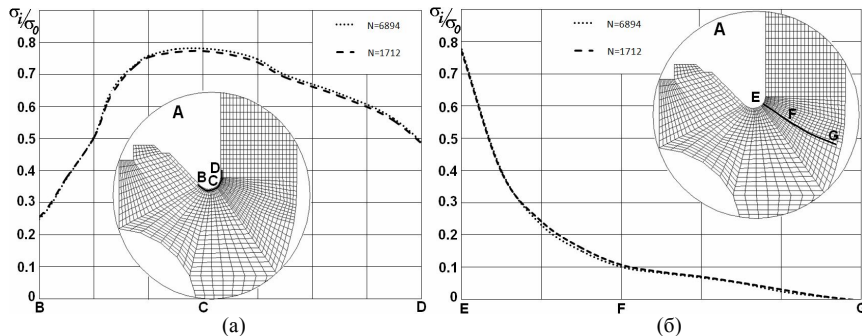


Рис. 7

Отримані результати показують непогану збіжність результатів на різних СЕМ. Оскільки на запорі клапана напруження максимальні, то саме це місце являється найбільш вірогідним для виникнення і розвитку тріщини.

Для руйнування змішаного типу, при  $K_I \neq 0$ ,  $K_{II} \neq 0$  умова руйнування має вигляд  $\tilde{K} = K_{Ic}$  де  $\tilde{K} = \sqrt{K_I^2 + 1,78K_{II}^2}$ . Із графіка залежності  $\tilde{K}/K_{Ic}$  від довжини тріщини  $l$  (рис. 8) видно, що в інтервалі довжин тріщини  $(0,2...0,6)h$  величина  $\tilde{K}/K_{Ic}$  змінюється несуттєво, і лише при наближенні вершини тріщини до зовнішньої поверхні клапана спостерігається його поступове прискорене збільшення. Також на даному графіку видно, що результати отримані модифікованим методом реакцій нічим не поступаються отриманих в роботі [4]. Катастрофічне руйнування відбудеться при виконанні умови  $\tilde{K} = K_{Ic}$  по досягненні тріщиною довжини  $0,83h$ .

Обґрунтуванням можливості застосування співвідношень лінійної механіки руйнування до розв'язання даної задачі служить мала величина пластичної зони у вершині тріщини, розмір якої обчислювався за формулою:

$$r_p = \frac{(1-2\nu)^2}{2\pi} \left( \frac{\tilde{K}}{\sigma_T} \right)^2. \quad (2)$$

Відношення  $r_p/l$  в діапазоні до  $l \leq 0,8h$  не перевищувало  $1/500$ , що свідчить про квазікрихкий характер руйнування конструкції. Таким чином, тріщина довжиною  $l \leq 0,6h$  є припустимою.

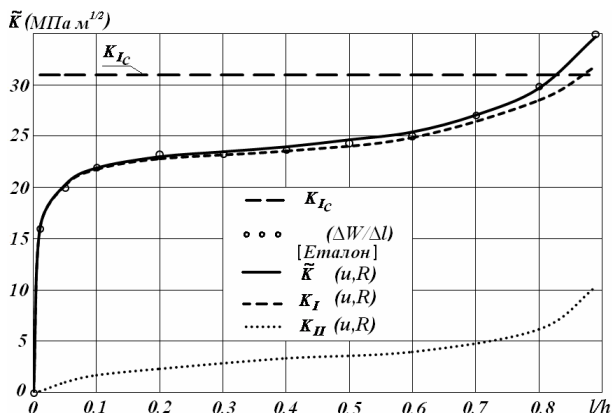


Рис. 8

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

**3. Дослідження впливу геометричної нелінійності на деформування та визначення J-інтеграла компактного зразку.** Для дослідження впливу геометричної нелінійності на параметри напружено-деформованого стану та величину J-інтеграла розглянуто компактний зразок (рис. 9(a)) результати розрахунку якого без урахування геометрично нелінійного деформування наведені в монографії Е.М. Морозова, Г.П. Нікішкова [9]. Розрахункова схема з урахуванням симетрії об'єкта подана на (рис. 9(б)) ( $W=100$  мм,  $W_1=1,25 W$ ,  $H=0,6W$ ,  $H_1=0,325W$ ,  $D=0,25W$ ,  $L$  – довжина тріщини,  $L/W=0,5$ ).

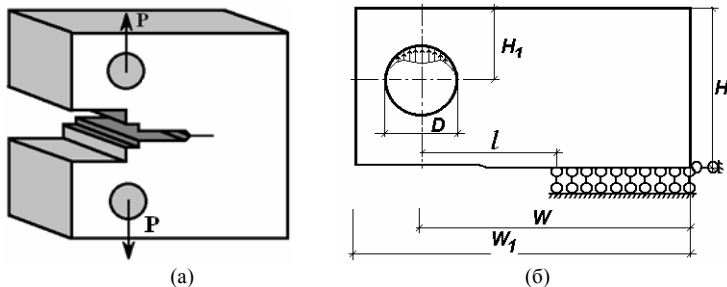


Рис. 9

Розрахунок виконаний при розподіленні прикладеного зусилля  $P$  за синусоїдальним законом, яке змінюється при плоско деформованому стані від 0 до 9000 кг, а при плоско напруженому стані від 0 до 7000 кг. Матеріал зразка – сталь 12Х2МФА. Пластичне деформування матеріалу із достатнім ступенем точності апроксимується залежністю

$$\sigma_i = \sigma_T \left( 1 + 6.45 \epsilon_p^{0.388} \right), \quad (3)$$

Напруження текучості, при якому появились перші пластичні деформації, дорівнюють  $\sigma_T = 637 \text{ МПа}$  [9].

Дискретна скінченоелементна модель компактного зразку будувалася з використанням квазірегулярної схеми за допомогою якої сітка була згущена в місцях виникнення найбільших напружень і структура сітки аналогічна наведеній в роботі [9] і показана на рис. 10.

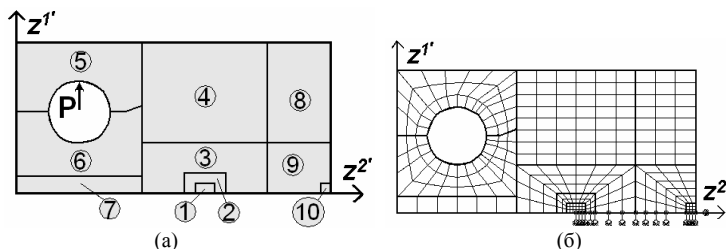


Рис. 10

На рис. 11 наведена залежність J-інтеграла від величини навантаження при пружно-пластичному деформуванні, яка збігається із наведеною в роботі [9], як для плоско деформованого стану (рис. 11(a)) так і плоско напруженого стану (рис. 11(б)).

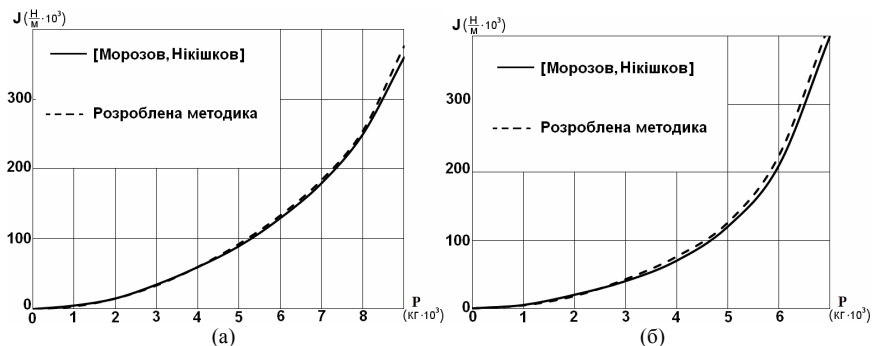


Рис. 11

Наступний етап розрахунку полягав в дослідженні впливу геометричної нелінійності на параметри напружено-деформованого стану компактного зразка. Залежність розвитку деформацій пластичності при збільшенні навантаження для обох постановок зображена на (рис. 12(a)) з урахуванням і без урахування формозмінення. Розкриття тріщини в компактному зразку під час деформування при  $P=9000 \text{ кг}$  зображене на (рис. 12(б)) при фізично нелінійному розв'язку без та з урахуванням геометричної нелінійності для плоскої деформації (PD) та плоско напруженого стану (PNS).

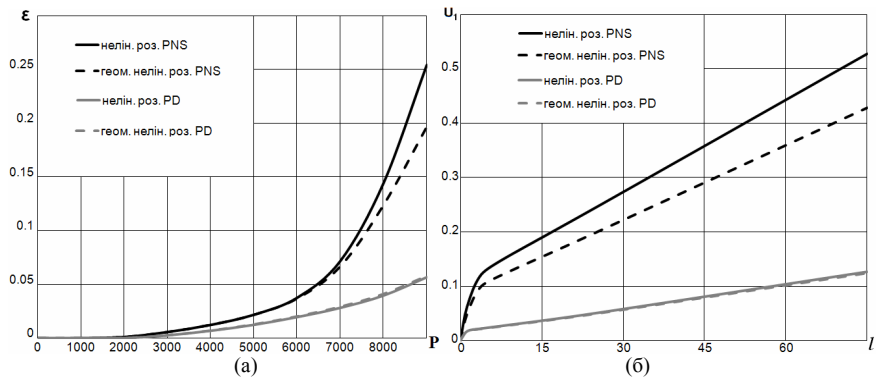


Рис. 12

На рис. 13 наведені графіки переміщень для плоскої деформації (PD) та плоско напруженого стану (PNS) з урахуванням і без урахування формозмінення в вузлах дискретної моделі, які знаходяться найближче до вершини тріщини (перший вузол від закріплення) та найвіддаленіше (край компактного зразку).

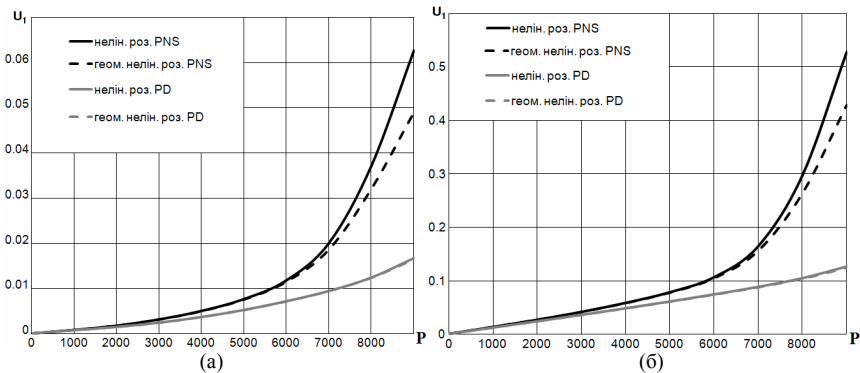


Рис. 13

Аналіз наведених графіків дозволяє зробити висновок, що врахування геометричної нелінійності зменшує значення величин деформацій та переміщень. Це повністю співпадає з висновками, які наведені в попередніх роботах для тестових прикладів.

На рис. 14 зображені графіки значень J-інтеграла в залежності від інтенсивності навантаження  $P$  з урахуванням і без урахування формозмінення у випадку плоскої деформації (PD) (рис. 14(a)) і плоско напруженого стану (PNS) (рис. 14(б)) спостерігається розбіжність максимальних значень J-інтеграла в межах 9% для плоско деформованого стану, та в півтора рази для плоско-напруженого стану.



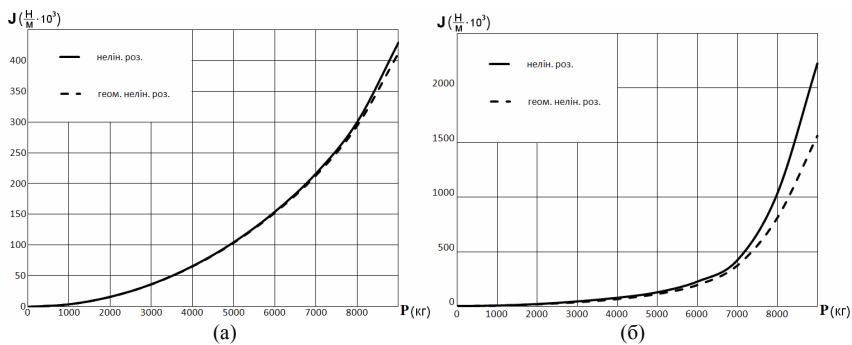


Рис. 14

Це свідчить про суттєвий вплив геометричної нелінійності, як і на загальну картину напружено-деформованого стану так і на максимальні значення  $J$  - інтеграла.

Таким чином, можна зробити висновок, що коректне визначення  $J$ -інтеграла компактного зразка необхідно виконувати в фізично і геометрично нелінійній постановці.

**Висновок.** В даному розділі отримані розв'язки нових прикладних задач будівельної механіки про вплив формозмінення на величини ресурсу і тріщиностійкості конструктивних елементів машинобудівної промисловості в експериментальних зразках для визначення параметрів тріщиностійкості.

Виявлено, що незважаючи на відносно незначні зміни параметрів пружно-деформованого стану в межах 3% величина ресурсу збільшилася на 12% для стопорного клапана порівняно з геометрично лінійним розрахунком, що має суттєве значення для визначення терміну експлуатації даного об'єкту. Розрахунок компактного зразка при плоско деформованому та плоско напруженому станах показав необхідність урахування геометричної нелінійності для коректного отримання значень характеристик руйнування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А.* Особливості використання моментної схеми скінчених елементів (МССЕ) при нелінійних розрахунках оболонки і пластин / В.А. Баженов, О.С. Сахаров, О.І. Гулярь, С.О. Пискунов, Ю.В. Максим'юк // *Опір матеріалів і теорія споруд.* – 2017. - Вип.92. – С. 3-16.
2. *Баженов В. А.* Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах континуального руйнування просторових тіл: Монографія / В. А. Баженов, О. І. Гулярь, С. О. Пискунов, О. С. Сахаров – К.: КНУБА, 2014. – 235 с.
3. *Баженов В. А.* Решение линейных и нелинейных пространственных задач механики разрушения на основе полуаналитического метода конечных элементов. Сообщение 1. Теоретические основы и исследование эффективности конечно-элементной методики решения пространственных задач механики разрушения / Баженов В. А., Гулярь А. И., Пискунов С. О. [и др.] // *Проблемы прочности.* - 2011. – Вип. 1. – С. 27-39.
4. *Баженов В. А.* Решение линейных и нелинейных пространственных задач механики разрушения на основе полуаналитического метода конечных элементов. Сообщение 2. Методика определения инвариантного  $J$ -интеграла в дискретных моделях МКЭ. / Баженов В. А., Гулярь А. И., Пискунов С. О. [и др.] // *Проблемы прочности.* - 2011. – Вип. 2. – С. 17-32.

5. Гуляр О.І. Ефективність моментної схеми скінчених елементів (МССЕ) в задачах згину та з концентраторами напружень / О.І. Гуляр, С.О. Пискунов, І.І. Солодей, Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2012. - Вип.89. – С. 43-57.
6. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974.– 312 с.
7. Максим'юк Ю.В. Индиферентність тензорів деформацій, напружень та їх прирощень при умові енергетичної сполученості. / Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. - Вип.99. – С. 151-159.
8. Максим'юк Ю.В. Розрахункові співвідношення універсального скінченого елемента на основі моментної схеми скінчених елементів / Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2015. - Вип.94. – С. 244-251.
9. Морозов Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – М. : Наука, 2007. – 256 с.
10. Пискунов С.О. Прямий метод визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень в призматичних та просторових незамкнених тілах обертання при статичному навантаженні. / С.О.Пискунов, О.О.Шкриль, С.В.Мицюк, Б.І.Сизевич // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2016. - Вип.97. – С. 16-27.
11. Шкриль О.О. Визначення G-інтеграла на основі обчислення інваріантних об'ємних інтегралів методом реакцій. / О.О.Шкриль // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. - Вип.98. – С. 31-42.
12. Bazhenov V.A. A Modified Method for Evaluating the Invariant J-Integral in Finite-Element Models of Prismatic Bodies / V.A.Bazhenov, A.S.Sakharov., Y.V.Maksim'yuk., A.A.Shkryl' // International Applied Mechanics 52(2), 2016, pp. 140-146.

## REFERENCES

1. Bazhenov V.A. Osoblivosti vikoristannya momentnoyi shemi skinchenih elementiv (MSSE) pri neliniynih rozrahunkah obolonok i plastin (Peculiarities of using the finite element moment scheme (FEMS) in nonlinear calculations of shells and plates) / V.A. Bazhenov, O.S. Saharov, O.I. Gulyar, C.O. Piskunov, Yu.V. Maksim'yuk // Opir materialiv i teoriya sporud. – 2017. - Vip.92. – S. 3 16.
2. Bazhenov V.A. Napivanalitichnyi metod skinchennih elemeniv v zadachah kontinualnogo ruynuvannya prostorovih til : Monografiya (Semibanalytic method of finite elements in problems of the continual destruction of spatial bodies) / V.A. Bazhenov, O.I. Gulyar, S.O. Piskunov, O.S. Saharov – K. : KNUBA, 2014. – 235 s.
3. Bazhenov V.A. Reshenie lineynykh i nelineynykh prostranstvennykh zadach mehaniki razrusheniya na osnove poluanaliticheskogo metoda konechnykh elementov. Soobschenie 1. Teoreticheskie osnovyi i issledovanie effektivnosti konechno-elementnoy metodiki resheniya prostranstvennykh zadach mehaniki razrusheniya (Solution of linear and nonlinear spatial problems of fracture mechanics based on the semi-analytical finite element method. Message 1. Theoretical foundations and investigation of the effectiveness of a finite-element method for solving spatial problems of fracture mechanics) / Bazhenov V.A., Gulyar A.I., Piskunov S.O. [i dr.] // Problemyi prochnosti. 2011. – Vip. 1. – S. 27 39.
4. Bazhenov V.A. Reshenie lineynykh i nelineynykh prostranstvennykh zadach mehaniki razrusheniya na osnove poluanaliticheskogo metoda konechnykh elementov. Soobschenie 2. Metodika opredeleniya invariantnogo J-integrala v diskretnykh modelyakh MKE. (Solving linear and nonlinear spatial problems of fracture mechanics based on the semi-analytical finite element method. Message 2. Method of determining the invariant J-integral in discrete models of FEM) / Bazhenov V.A., Gulyar A.I., Piskunov S.O. [i dr.] // Problemyi prochnosti. 2011. – Vip. 2. – S. 17-32.
5. Gulyar O.I. Efektivnist momentnoyi shemi skinchenih elementiv (MSSE) v zadachah zginu ta z konsentrotorami napruzhen (Efficiency of the finite element moment scheme (FEMS) in bending problems and stress concentrators) / O.I. Gulyar, S.O. Piskunov, I.I. Solodey, Yu.V. Maksim'yuk // Opir materialiv i teoriya sporud. – 2012. - Vip.89. – S. 43 57.
6. Качанов Л.М. Основы механики разрушения.( Fundamentals of Fracture Mechanics) – М.: Наука, 1974.– 312 с.
7. Максим'юк Ю.В. Индиферентність тензорів деформацій, напружень та їх прирощень при умові енергетичної сполученості. (The indifference of tensors of deformations, stresses and their increments under the condition of energy interconnection) / Ю.В. Максим'юк // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2017. - Vip.99. – С. 151 159.
8. Максим'юк Ю.В. Розрахункові співвідношення універсального скінченого елемента на основі моментної схеми скінчених елементів (Calculated ratios of a universal finite element

- based on a finite element timing scheme) / Yu.V. Maksim'yuk // Opir materialiv i teoriya sporud. – 2015. - Vip.94. – S. 244-251.
9. *Morozov E. M.* Metod konechnykh elementov v mehanike razrusheniya (The finite element method in fracture mechanics) / E.M. Morozov, G. P. Nikishkov. – M. : Nauka, 2007. – 256 s.
  10. *Piskunov S.O.* Pryamiy metod viznachennya koefitsientiv intensivnosti napruzhen v prizmatichnih ta prostорових nezamknenih tilah obertannya pri statichnomu navantazheni. (Straight line wise codename method i t mat ensiv ensiv ensiv ensiv nap nap nap v priz in prismatic and open spaces in a static wrapper with static navantazheni) / S.O.Piskunov, O.O.ShkriI, S.V.Mitsyuk, B.I.Sizevich // Opir materialiv I teoriya sporud. – 2016. - Vip.97. – S. 16-27.
  11. *ShkriI O.O.* Viznachennya G-integrala na osnovi obchislennya invariantnih ob'emnih integraliv metodom reaktsiy. (The value of the G-integral on the basis of the equivalent of the other internal integrals by the method of reactions) / O.O.ShkriI // Opir materialiv I teoriya sporud. – 2017. - Vip.98. – S. 31-42.
  12. *Bazhenov V.A.* A Modified method for evaluating the invariant J-integral in finite-element models of prismatic bodies / V.A.Bazhenov, A.S.Sakharov., Y.V.Maksimyuk., A.A.Shkryl' // International Applied Mechanics 52(2), 2016, pp. 140-146.

*Стаття надійшла до редакції 05.03.2018 р.*

*Maksymiuk Yu.*

#### **DETERMINATION OF THE FRACTURE RESISTANCE OF AXISYMMETRIC BODIES, TAKING INTO ACCOUNT THE CHANGE OF THE SHAPE**

In this paper, a generalization of the modified reaction method for calculating linear and nonlinear parameters of fracture mechanics in mixed problems with development under the influence of external loads of large deformations of plasticity has been carried out. The reliability of the results is substantiated by solving test cases and the results of the calculation of specific objects are given.

Possibilities of the methodology for investigating the processes of destruction of this class of objects are largely due to the efficiency of the finite element scheme for obtaining the calculated relations, the method of calculating the parameters of the destruction mechanics.

The spatial nature of the problems of the destruction mechanics leads to the necessity of using CEs, which are based on the relations of the theory of elasticity, even in the evaluation of the cracking strength of thin-walled shell objects, not to mention the bodies of a complex structure. It is in these cases that the use of universal CEs developed on the basis of MCCE in the formation of a general discrete design model is particularly evident

In the works [3, 4, 12] devoted to the development of effective energy approaches to the determination of the parameters of linear and nonlinear destruction mechanics, the advantage of the reaction method has been convincingly proved with the existing ones. Therefore, further generalization and development of the modified method of reactions to new classes of problems of destructive mechanics, related to the development of methods for mathematical modeling of the development of trunk cracks in the thermosensitive load and form-modification, are sufficiently substantiated and promising.

Determining the parameters of local fracture destruction is an important, but partial, problem of fracture mechanics. In practice, there are cases where a small initial small fracture is known and it is necessary to determine the conditions for the destruction of the structure, that is, the critical length of the crack at a given load. At the same time, the correctness of calculating the trajectory of the crack development depends to a large extent on the reliability of the entire calculation, since calculating the parameters of destruction along the trajectory, which does not coincide with the real one, can lead to an incorrect assessment of the bearing capacity of the structure as a whole.

It should be noted that a small amount of work is devoted to the simulation of crack development with the help of ITU [2]. Therefore, the development of effective algorithms in this direction is an actual problem of the mechanics of cracks.

In this paper, the focus is on the use of universal CEs [8], which allows to optimize discrete models of ITE when calculating the bodies of a complex structure. Determination of the parameters of destructive mechanics is realized by the modified reaction method, whose effectiveness in the case of mixed destruction is demonstrated in [3, 4].

**Key words:** physical and geometric nonlinearity, thin-walled massive and combined axisymmetric bodies, indifference, condition of energy connectivity, initial reckoning, intermediate variable reckoning and actual configuration.

Максимюк Ю.В.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ С УЧЕТОМ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

В данной работе проведено обобщение модифицированного метода реакций для вычисления линейных и нелинейных параметров механики разрушения в смешанных задачах при развитии под действием внешних нагрузок больших деформаций пластичности. Достоверность результатов обоснована путем решения тестовых примеров и приведены результаты расчета конкретных объектов.

**Ключевые слова:** физическая и геометрическая нелинейность, тонкостенные массивные и комбинированные осесимметричные тела, индифферентность, условие энергетической сопряженности, начальная отсчетной, промежуточная переменная отсчетной и актуальная конфигурация.

УДК 539.3

*Максим'юк Ю.В. Визначення тріщиностійкості вісесиметричних тіл з урахуванням формо зміння // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА, 2018. – Вип. 100. – С. 202-213.*

*В даній роботі проведено узагальнення модифікованого методу реакцій для обчислення лінійних і нелінійних параметрів механіки руйнування в змішаних задачах при розвитку під дією зовнішніх навантажень великих деформацій пластичності. Достовірність результатів обґрунтована шляхом розв'язання тестових прикладів і наведені результати розрахунку конкретних об'єктів.*

Табл. 0. Іл. 14. Бібліогр. 12 назв.

UDC 539.3

Maximiyuk Yu.V. **Determination of the fracture resistance of axisymmetric bodies taking into account the change of the shape** // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles – Kyiv: KNUBA, 2018. – Issue 100. – P. 202-213.

*In this paper, a generalization of the modified reaction method for calculating linear and nonlinear parameters of fracture mechanics in mixed problems with development under the influence of external loads of large deformations of plasticity has been carried out. The reliability of the results is substantiated by solving test cases and the results of the calculation of specific objects are given.*

Tabl. 0. Il. 14. Ref. 12.

УДК 539.3

*Максимюк Ю.В. Определение трещиностойкости осесимметричных тел с учетом формы изменения // Сопроотивление материалов и теория сооружений. – К.: КНУБА, 2018. – Вип. 100. – С. 202-213.*

*В данной работе проведено обобщение модифицированного метода реакций для вычисления линейных и нелинейных параметров механики разрушения в смешанных задачах при развитии внешних нагрузок больших деформаций пластичности. Достоверность результатов обоснована путем решения тестовых примеров и приведены результаты расчета конкретных объектов.*

Табл. 0. Ил. 14. Библиограф. 12 назв.

**Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада):** кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки КНУБА МАКСИМ'ЮК Юрій Всеволодович.

**Адреса робоча:** 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, КНУБА, кафедра будівельної механіки, Максим'юк Юрій Всеволодович.

**Адреса домашня:** Україна, м. Київ, вул. Кривоноса Максима, 6, кв. 322/3.

**Робочий тел.:** +38(044) 241-55-38;

**Мобільний тел.:** +38(067) 230-94-72;

**E-mail:** [maximiyuk@ukr.net](mailto:maximiyuk@ukr.net)

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