

УДК 539.3

ПРЯМИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ В ПРИЗМАТИЧНИХ ТА ПРОСТОРОВИХ НЕЗАМКНЕНИХ ТІЛАХ ОБЕРТАННЯ ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

С.О. Пискунов¹,
д-р техн. наук,

О.О. Шкриль¹,
канд. техн. наук,

С.В. Мицюк¹,
канд. техн. наук

Б.І. Сизевич¹

*¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ
Повітрофлотський просп., 31, м. Київ. 03680*

На основі напіваналітичного методу скінченних елементів проведена розробка і апробація методики обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень прямим методом при силовому навантаженні. Розв'язані тестові задачі. Отримані результати підтверджують ефективність методики.

Ключові слова: напіваналітичний метод скінченних елементів, коефіцієнт інтенсивності напружень, просторові тіла з тріщинами.

Вступ. Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) прямим методом виконується за напруженнями або переміщеннями обчисленими в безпосередній близькості до вершини тріщини. Для розв'язання таких задач найчастіше використовують метод скінченних елементів (МСЕ) [6,7]. Слід зауважити, що при розрахунках на основі МСЕ точність значень переміщень та напружень обчислених в околі вершини тріщини є низькою. Щоб подолати таке явище в монографіях [1,2] було запропоновано підхід до обчислення КІН, який базується на усередненні їх значень по деякій привершинній області. Проведені на двовимірних задачах дослідження показали перевагу цього підходу порівняно із локалізованим обчисленням КІН в окремих точках. Тому такий метод був використаний для розв'язку окремих просторових задач на основі напіваналітичного методу скінченних елементів (НМСЕ) [3].

Мета даної роботи полягає в узагальненні методу усереднення по області для всіх типів тріщин в просторових незамкнених тілах обертання і призматичних тілах при статичному навантаженні.

1. Співвідношення механіки руйнування. Розглянемо просторові незамкнені тіла обертання (рис. 1,а,б) і призматичні тіла (рис. 2,а,б) з

поздовжніми і поперечними тріщинами в базисних циліндричній і декартовій системах координат $z^{i'}$.

Для опису просторового напружено-деформованого стану (НДС) в околі фронту тріщини застосовується пов'язана із тріщиною система координат $y^{i''}$: вісь $y^{1''}$ спрямована за нормаллю до поверхні тріщини, $y^{3''}$ – вздовж дотичної до фронту.

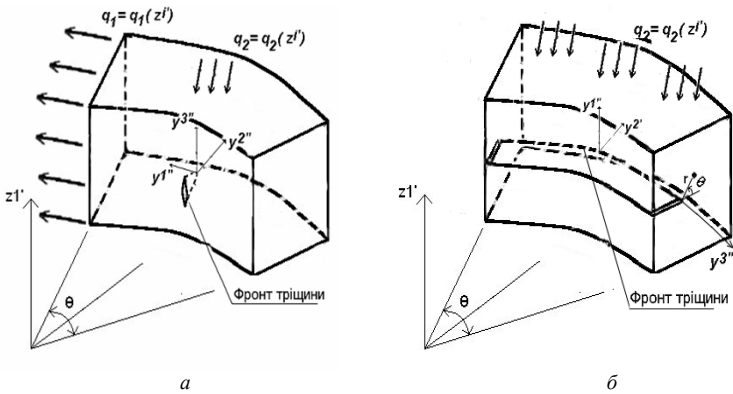


Рис. 1. Тіла обертання з поперечною (а), та поздовжньою (б) тріщинами

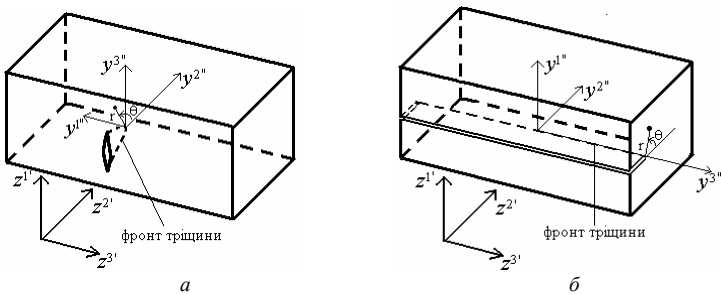


Рис. 2. Призматичні тіла з поперечною (а), та поздовжньою (б) тріщинами

Для визначення КІН в довільній точці фронту тріщини розглядають переріз що перетинає цю точку і є перпендикулярним до поверхні тріщини (рис. 3)

Визначення КІН в такому перерізі виконується за асимптотичними формулами, які встановлюють взаємозв'язок між

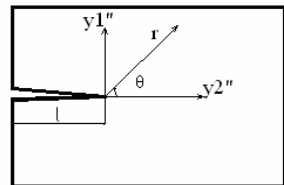


Рис. 3. Площина визначення КІН в точці фронту тріщини

переміщеннями і напруженнями та КІН K_I , K_{II} , K_{III} [4]:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} u_1'' \\ u_2'' \\ u_3'' \end{Bmatrix} &= \frac{\sqrt{2r}}{G\sqrt{\pi}} \left[\frac{K_I}{8} \begin{bmatrix} (5-8\nu)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2} \\ (7-8\nu)\sin\frac{\theta}{2} - \sin\frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} + \frac{K_{II}}{8} \begin{bmatrix} (9-8\nu)\sin\frac{\theta}{2} - \sin\frac{3\theta}{2} \\ (-3+8\nu)\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2} \end{bmatrix}, \right. \\ &\quad \left. K_{III} \sin\frac{\theta}{2} \right] \\ \begin{Bmatrix} \sigma^{11}'' \\ \sigma^{22}'' \\ \sigma^{33}'' \\ \sigma^{12}'' \\ \sigma^{13}'' \\ \sigma^{23}'' \end{Bmatrix} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_I \begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 + \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right) \\ \cos\frac{\theta}{2} \left(1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right) \\ 2\nu \cos\frac{\theta}{2} \\ \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} + K_{II} \begin{bmatrix} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2} \\ -\sin\frac{\theta}{2} \left(2 + \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2}\right) \\ -2\nu \sin\frac{\theta}{2} \\ \cos\frac{\theta}{2} \left(1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right) \end{bmatrix}, \right. \\ &\quad \left. K_{III} \begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2} \\ -\sin\frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \right], \quad (1) \end{aligned}$$

де r , θ – полярні координати з початком у точці фронту тріщини, для якої визначені КІН; G – модуль зсуву; ν – коефіцієнт Пуассона; I , II , III – індекси, що визначають тип руйнування.

Для випадку тріщин нормального відриву, що розглядаються найчастіше вирази (1) набудуть вигляду:

$$\begin{aligned} \sigma^{11}'' &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 + \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right), \\ \sigma^{12}'' &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2}, \\ \sigma^{22}'' &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right), \\ u_1'' &= \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\frac{\theta}{2} \left(2 - 2\nu - \cos^2\frac{\theta}{2}\right), \\ u_2'' &= \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2\frac{\theta}{2}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

2. Скінченно-елементна дискретизація просторових тіл з тріщинами. При моделюванні просторових незамкнених тіл обертання та призматичних тіл із тріщинами на основі НМСЕ в залежності від розташування тріщини відносно утворюючої, розрізняють тіла із поздовжньою (рис. 4,а, 5,а) та поперечною (рис. 4,б, 5,б) тріщинами. Скінченно-елементна дискретизація об'єкта відбувається в поперечному перерізі, а вздовж утворюючої використовується один скінчений елемент,

який повторює форму тіла (рис. 4, 5). Розбивка об'єкта на скінченні елементи передбачає згущення сітки в привершинній області. Результати дослідження з питань визначення кількості скінченних елементів (СЕ) в привершинній зоні та їх характерних розмірів наведені в [1,2].

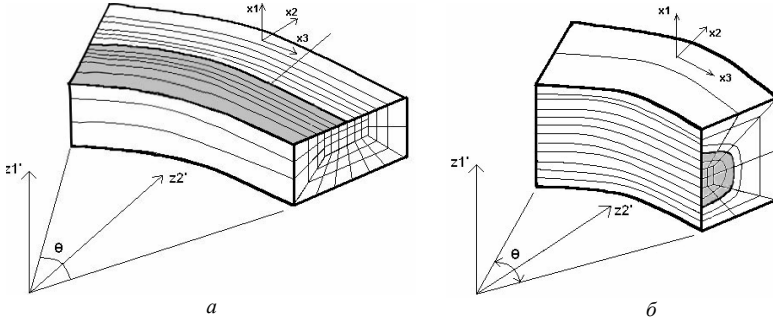


Рис. 4. Дискретизація просторових незамкнених тіл обертання з поздовжніми (а) та поперечними (б) тріщинами

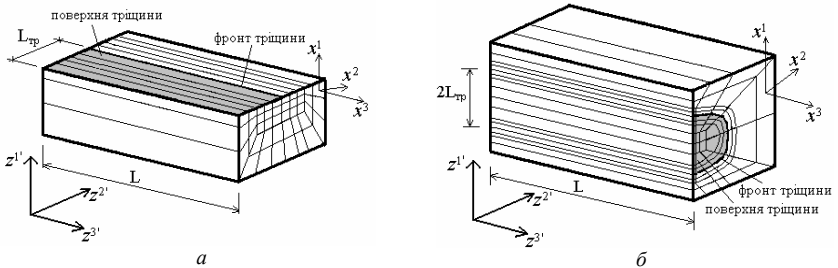


Рис. 5. Дискретизація призматичних тіл з поздовжніми (а) та поперечними (б) тріщинами

3. Реалізація методики визначення КІН для просторових тіл з поздовжніми тріщинами. Обчислення КІН базується на методиці, докладне викладення і опис реалізації якої при застосуванні МСЕ для двовимірних тіл описаний в [1,2]. Реалізація цієї методики в межах НМСЕ при розгляді просторових тіл з тріщинами має певні особливості. На відміну від двовимірних задач, в просторових тілах визначення КІН проводиться в низці точок вздовж фронту тріщини (рис. 6,а,б). Для тіл з поздовжніми тріщинами такими точками є точки інтегрування, розташовані вздовж вісі x^3 (рис. 6). Таким чином КІН визначаються по всім точкам інтегрування, що розташовані вздовж фронту тріщини. Привершинна область для кожної точки інтегрування знаходиться в площині поперечного перерізу тіла $z^1 - z^2$. Обчислення КІН за напруженнями $K(\sigma)$ виконується в центрах СЕ позначених на рис. 7

кружками. Обчислення КІН за переміщеннями $K(u)$ здійснюється у вузлах СЕ моделі позначених хрестиками (рис. 7). Таким чином визначення КІН в межах привершинної області відбувається в поперечному перерізі тіла за аналогією з двовимірними задачами [1,2].

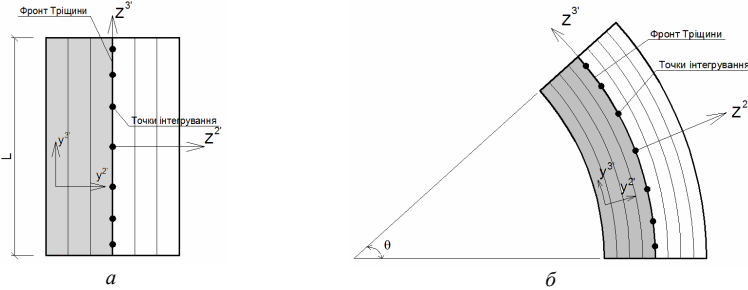


Рис. 6. Точки визначення КІН в призматичних тілах (а) та просторових незамкнених (б) тілах обертання з поздовжніми тріщинами

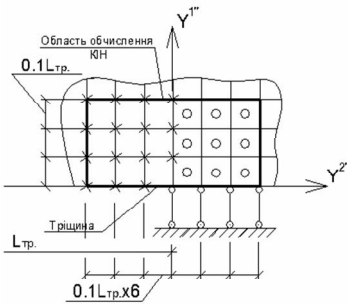


Рис. 7. Привершинна область визначення КІН в тілах з поздовжніми тріщинами

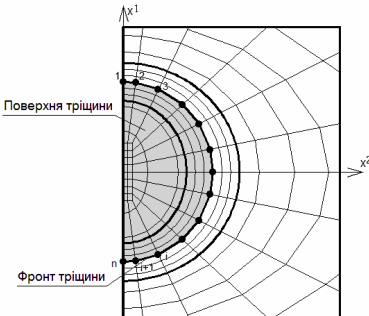


Рис. 8. Точки визначення КІН в просторових тілах з поперечними тріщинами

4. Реалізація методики визначення КІН для просторових тіл з поперечними тріщинами. Для тіл з поперечними тріщинами точки визначення КІН являють собою вузли СЕ моделі, що розташовані вздовж фронту тріщини (рис. 8).

Для визначення КІН у вузлі фронту тріщини виділяють привершинну область, яка є ортогональною до поверхні і фронту тріщини (рис. 9,а,б). Точки визначення КІН за переміщеннями $K(u)$ (позначені хрестиками) співпадають з точками інтегрування, в яких відомі значення переміщень для вузлів розташованих на поверхні тріщини. Точки визначення КІН за напруженнями $K(\sigma)$ (позначені кружками) співпадають з точками інтегрування, в яких відомі значення напружень в елементах, розташованих на закріпленій поверхні.

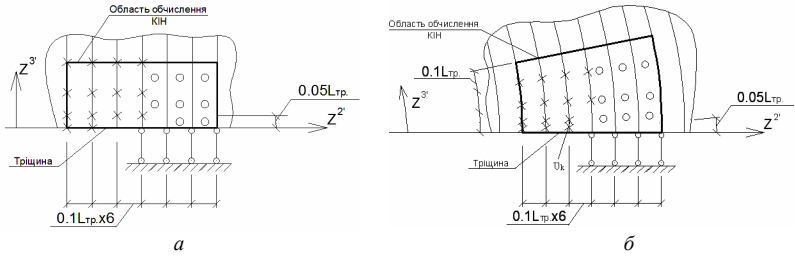


Рис. 9. Привершинна область для призматичних (а) та просторових незамкнених тіл обертання (б) з поперечними тріщинами

Враховуючи вимоги методики, пов'язані з явищем сингулярності, в точках, розташованих на відстанях менших $0.1L_{тр}$ ($L_{тр}$ довжина тріщини) вздовж вісей y^1 , y^2 від вершини тріщини КІН не визначається. Також не визначається КІН за напруженнями в точках, що розташовані ближче $0.05L_{тр}$ від вісі y^2 (рис.10). Такий підхід отримав назву модифікованого методу обчислення КІН [1,2]

Оскільки площина визначення $K(u)$ не співпадає з площиною визначення $K(\sigma)$ на половину довжини елемента вздовж фронту тріщини, виникає питання узгодження цих двох значень КІН. Для вирішення цієї проблеми в проміжних вузлах фронту тріщини виконується усереднення двох значень $K(\sigma)$ отриманих для двох сусідніх елементів (рис. 11). Таким чином отримуємо значення $K(\sigma)$ у вузлі, що є спільним для двох елементів:

$$K(\sigma) = \frac{K(\sigma)_{(i-1)} + K(\sigma)_i}{2}.$$

В крайніх вузлах фронту тріщини значення $K(\sigma)$ приймаються такими, що обчислені для крайніх елементів:

$$K(\sigma)_1 = K(\sigma)_1, \quad K(\sigma)_n = K(\sigma)_{(n-1)}.$$

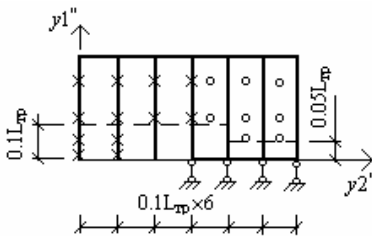


Рис. 10. Привершинна область для модифікованого варіанта визначення КІН

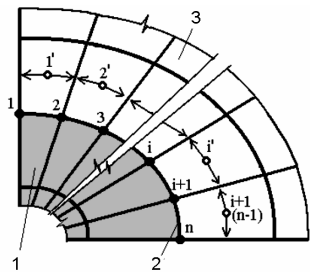


Рис. 11. Схема зведення $K(\sigma)$ до перерізів

Після приведення $K(\sigma)$ та $K(u)$ до однієї площини виконується обчислення результуючого КІН

$$K = \frac{K(u) + K(\sigma)}{2}.$$

5. Контрольні приклади.

З метою дослідження ефективності розробленої методики в межах НМСЕ для розв'язання задач механіки руйнування в призматичних тілах з тріщинами, було проведено розв'язання задачі про розтяг квадратної пластини з центральною тріщиною (рис. 12,*а*) різної довжини, для якої існує аналітичний розв'язок [4,5]. Скінченно-елементні моделі НМСЕ для пластини розроблені при розгляді її тріщини як поздовжньої (1 варіант, рис. 12,*б*) так і поперечної (2 варіант, рис. 12,*в*).

Обчислення, проведені з різною кількістю скінчених елементів в напрямку, перпендикулярному до поверхні тріщини (рис. 12,*б*), свідчать, що оптимальнішим є модифікований варіант обчислення КІН (рис.13).

Необхідно відзначити, що у випадку розгляду поперечної тріщини на основі НМСЕ густина скінченно-елементної апроксимації в напрямку, перпендикулярному вісі тріщини, визначається особливостями розкладання переміщень на основі НМСЕ за напрямком z^3 , а саме кількістю поліномів і мінімально необхідною кількістю для реалізації розкладання фіксовано розташованих точок інтегрування [1,2].

При розгляді цієї тріщини як поздовжньої, СЕ апроксимація в напрямку перпендикулярному до фронту тріщини виконується на засадах МСЕ, який є вільним від обмежень розташування вузлів СЕ моделі. В зв'язку з цим для проведення коректного порівняння ефективності МСЕ і НМСЕ розрахунок був проведений при однаковій кількості поліномів і СЕ в

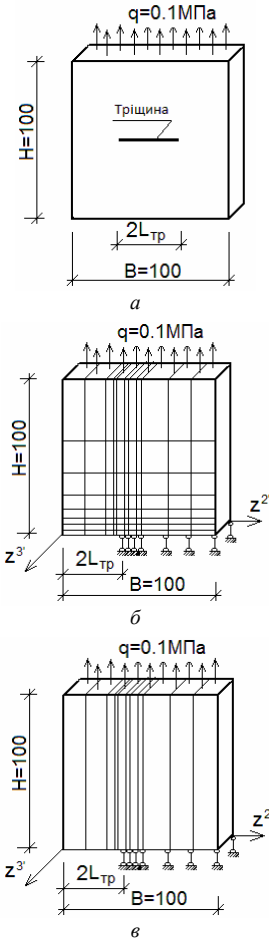


Рис. 12. Дискретні моделі пластини з центральною тріщиною (*а*) при представленні тріщини у вигляді поздовжньої (*б*) або поперечної (*в*)

напрямку перпендикулярному фронту тріщини відповідно для поперечної і поздовжньої тріщини.

Виявилось, що залежність точності визначення КІН від кількості утримуваних членів ряду або СЕ в напрямку перпендикулярному до лінії тріщини фактично одного порядку. Так, похибка визначення КІН в обох випадках при 16 СЕ або членів ряду становить близько 2% для усіх довжин тріщини (рис. 13,б). Хоча слід відзначити, що в деяких випадках збіжність результатів, отриманих на основі МСЕ, на декілька процентів точніше ніж за НМСЕ. Наприклад для тріщини, яка становить половину довжини пластини розбіжність результатів НМСЕ при 8 утримуваних членах ряду становить 2%, а при 16 – 1%.

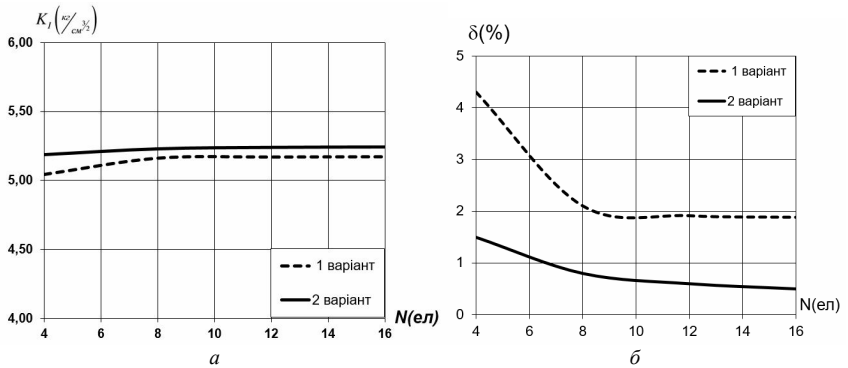


Рис. 13. Збіжність значень КІН (а) та їх похибки (б) при різних варіантах представлення тріщини

Також досліджувалось питання про кількість точок інтегрування в привершинній області, потрібних для забезпечення збіжності результатів. Кількість точок інтегрування, за якими проводиться визначення КІН за переміщеннями і які розташовані вздовж лінії ортогональної до площини фронту тріщини, приймалася від 3 до 8. Для визначення КІН за напруженнями кількість точок інтегрування в напрямку z^3 приймалася від 2 до 5. Значення результуючого КІН при використанні різної кількості точок інтегрування відрізнялись в межах 2%. Тому було прийнято, що мінімальна кількість точок у вказаному напрямку для визначення усередненого КІН за переміщеннями повинна бути не меншою 3, а для визначення усередненого КІН за напруженнями не менше 2.

Враховуючи, що обсяг обчислень, необхідний для розв'язку задачі НМСЕ на декілька порядків менший, при однаковій кількості невідомих з МСЕ [1,2], можна стверджувати що ефективність НМСЕ значно перевищує ефективність МСЕ в широкому діапазоні довжин тріщин (рис. 14).

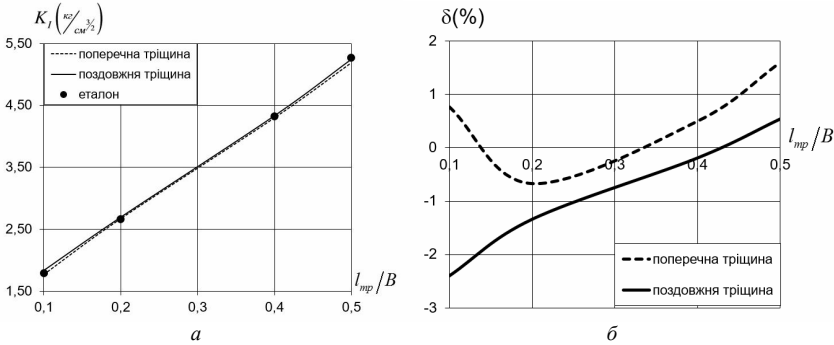


Рис. 14. Значення КІН (а) та їх похибки (б) при різних довжинах центральної тріщини

З метою дослідження достовірності і ефективності НМСЕ в просторових задачах механіки руйнування для просторових незамкнених тіл обертання було проведено розв'язування задачі визначення КІН в диску з двома тріщинами, що знаходиться під впливом внутрішнього тиску. Загальна схема диску показана на рис. 15,а, а дискретна модель НМСЕ – на рис. 15,б, де також показана область визначення КІН, що аналогічна рис. 9,б.

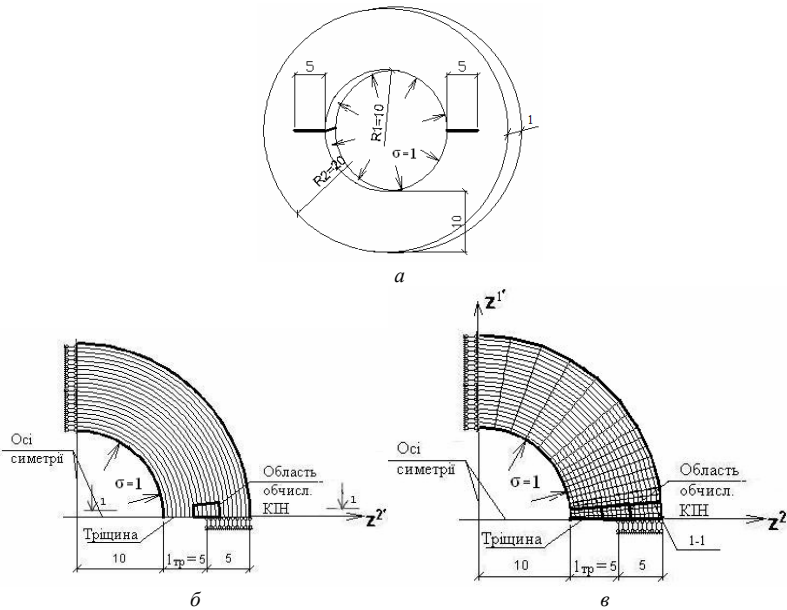


Рис. 15. Дискретні моделі НМСЕ для поперечної (б) та поздовжньої (в) тріщини в диску з двома внутрішніми тріщинами під дією внутрішнього тиску (а)

Внаслідок симетрії розглядалась чверть диска. Розв'язання задачі здійснено із використанням 30 гармонік в представленні переміщень за напрямком z^3 . Отримані результати були порівняними із еталонним розв'язком [5] (табл. 1). Як видно, результати визначення КІН для двох постановок тріщин добре узгоджуються з еталонним розв'язком.

Таблиця 1

Тип моделювання тріщини	КІН	$\delta, \%$
поперечна	2.629	1.899
поздовжня	2.781	- 3.772
Еталон [5]	2,679	-

Висновок. Таким чином, розроблена в НМСЕ методика, дозволяє з високою ефективністю визначати КІН прямим методом як в призматичних так і просторових незамкнених тілах обертання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Сахаров О.С.* Напіваналітичний метод скінченних елементів в задачах руйнування просторових тіл: Монографія – К.: КНУБА, 2005. – 298с.
2. *Баженов В.А., Гуляр А.И., Сахаров А.С., Топор А.Г.* Полуаналитический метод конечных элементов в механике деформируемых тел. – К.:НИИСМ, 1993. – 376 с.
3. *Гуляр О.І., Пискунов С.О., Сахаров О.С., Шкриль О.О.* Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень в призматичних тілах з тріщинами // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2003. – Вип. 74. – С. 73–82.
4. *Морозов Е.М., Никишков Г.П.* Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: “Наука”, 2007. – 256 с.
5. *Саврук М.П.* Коэффициенты интенсивности напряжения в телах с трещинами – Т.2 - 1998.-620с.
6. *Банько С.М., Кобельський С.В., Харченко В.В.* Чисельне моделювання напруженого стану полого циліндра з дефектом у вигляді каверни з тріщиною //Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2014. – Вип. 92. – С. 157–169.
7. *Харченко В.В., Банько С.М., Кобельський С.В.Кравченко В.І.* Чисельний розв'язок задачі про опір руйнуванню полого циліндра з дефектом у вигляді каверни з тріщиною в пружно-пластичній постановці // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2014. – Вип. 93. – С. 134–145.

REFERENCES

1. *Bazhenov V.A., Gulyar A.I., Piskunov S.O., Saharov A.S.* Napivanalitichniy metod skinchennih elementiv v zadachah ruynuvannya prostоровih til (Semianalitic finite element method in problems of fracture spatial bodies): Monografiya – K.: KNUBA, 2005. – 298 p.
2. *Bazhenov V.A., Gulyar A.I., Sakharov A.S., Topor A.G.* Poluanaliticheskiy metod konechnykh elementov v mekhanike deformiruyemykh tel(Semianalitic finite element method in the mechanics of deformable bodies). - K.: NIISM, 1993. - 376 s.

3. *Gulyar O.Í., Piskunov S.O., Sakharov O.S., Shkril' O.O.* Vznachennya koyefitsiéntiv intensivnosti napruzhen' v prizmatichnikh tilakh z trishchinami (Determination of stress intensity factors in prismatic bodies with cracks) // *Opir materialiv i teoriya sporud* : Nauk. - tekhn. zbirnik. - K. : KNUBA, 2003. - Vip . 74. - Pp. 73-82 .
4. *Morozov E.M., Nikishkov G.P.* Metod konechnih elementov v mehanike razrusheniya (Finite element method in fracture mechanics). – Moskow.: “Librocom”, 2010. - 256 p.
5. *Savruk M.P.* Koeffitsiyenty intensivnosti napryazheniya v telakh s treshchinami (The coefficients of the stress intensity in cracked bodies) - T.2 - 1998. – 620 p.
6. Banko SM, Kobelsky SV, Kharchenko VV Chiselne modelyuvannya napruzhenogo become hollow tsilindra s defect in viglyadi caverns s trishchinoyu (Numerical simulation of the stress state of hollow cylinder with a defect in a cavern with crack) // *Opir materialiv i teoriya sporud*: Nauk.-tehn. zbirnik. - K. : KNUBA, 2014 - Vip. 92. - P. 157-169.
7. Kharchenko VV, Banko SM, Kobelsky S.V.Kravchenko V.I. Chiselny rozvyazok zadachi about opir ruynuvannyyu hollow tsilindra s defect in viglyadi caverns s trishchinoyu in pruzhno-plastichniy postanovtsi (Numerical solution problem of fracture resistance hollow cylinder with a defect in a cavity of a crack in elastic-plastic)// *Opir materialiv i teoriya sporud*: Nauk.-tehn. zbirnik. - K. : KNUBA, 2014 - Vip. 93. - P. 134-145.

Piskunov S.O., Shkril' A., Mitsuk S., Sizevich B.

DIRECT METHOD FOR DETERMINING THE STRESS INTENSITY FACTOR IN A PRISMATIC AND SPATIALLY NON-CLOSED SOLIDS OF REVOLUTION UNDER STATIC LOAD

The technique for determining of the stress intensity factors (CIF) by a direct method in discrete models of the semi-analytical finite element method (SFEM) for bodies with transverse and longitudinal cracks is considered in this paper. The calculation of the CIF is performed within some area which is around of the crack-tip. Asymptotic formulas which established the relationship between displacements, stresses and the corresponding CIF values are used for CIF determination. CIF values are calculated using of the nodes displacements in the one part of the area, and in the other part of the area – using the stress values. Obtained values are averaged then. The studies carried out on two-dimensional problems showed the advantage of this approach in comparison with the localized (at individual points) calculation of CIF. In contrast to two-dimensional problems, CIF definition in spatial bodies is carried out at a number of points along the crack front. To calculate CIF value at an arbitrary point of the crack front a section which is perpendicular to the crack surface is considered. The implementation of CIF determining technique in SFEM has some special features. For bodies with longitudinal cracks, such points of the crack front are integration which are located along the finite element. CIF definition within crack-tip area occurs in the body cross section similarly to two-dimensional problems in this case. For bodies with transverse cracks points of CIF determination are nodes of a discrete model located along the crack front. The problem of the tension of square plate with a central crack of different lengths was solved in order to study the effectiveness of the developed technique within the SFEM for prismatic bodies. The problem of CIF determining in a disk with two cracks under internal pressure was solved to prove technique effectiveness for spatial non closed circular bodies. The obtained results showed that the developed technique allows determining CIF values with high efficiency by a direct method both in prismatic and spatial non closed circular bodies using SFEM.

Key words: semi-analytical finite element method, the coefficient of stress intensity, spatial body with cracks.

Пискунов С.О., Шкрюль А.А., Мицюк С.В., Сизевич Б.И.

ПРЯМОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРИЗМАТИЧЕСКИХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕЗАМКНУТЫХ ТЕЛАХ ВРАЩЕНИЯ ПРИ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

На основе полуаналитического метода конечных элементов проведена разработка и апробация методики вычисления коэффициента интенсивности напряжений прямым методом при силовой нагрузке. Решены тестовые задачи. Полученные результаты подтверждают эффективность методики.

Ключевые слова: полуаналитический метод конечных элементов, коэффициент интенсивности напряжений, пространственные тела с трещинами.

Автор (вчена ступінь, вчене звання, посада): професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки КНУБА Пискунов Сергій Олегович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Пискунов Сергій Олегович.

Адреса домашня: 03087, Україна, м. Київ, вул. Іскрівська б.3, кв.10

Роб. тел. +38(044) 241-5555;

мобільний тел.: +38(050) 962-66-14.

E-mail s_piskunov@ua.fm

Автор (вчена ступінь, вчене звання, посада): доцент, кандидат технічних наук, докторант кафедри будівельної механіки КНУБА Шкрюль Олексій Олександрович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Шкрюлю Олексію Олександровичу.

Адреса домашня: 08132, Україна, м. Вишневе, вул. Щорса 10, кв. 24

Роб. тел. +38(044) 241-5555;

мобільний тел.: +38(050) 307-61-49.

E-mail – alexniism@ukr.net

Автор (вчена ступінь, вчене звання, посада): доцент, кандидат технічних наук, н.с. НДІБМ КНУБА Мицюк Сергій Вікторович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Мицюку Сергію Вікторовичу.

Адреса домашня: 03037, Україна, м. Київ, просп. Валерія Лобановського 10, кв. 301

Роб. тел. +38(044) 241-5555;

мобільний тел.: +38(096) 931-74-42.

E-mail – serewka@inbox.ru

Автор (вчена ступінь, вчене звання, посада): доцент кафедри будівельної механіки КНУБА Сизевич Борис Іванович.

Адреса робоча: 03680 Україна, м. Київ, Повітрофлотський проспект 31, Київський національний університет будівництва і архітектури, кафедра будівельної механіки, Сизевичу Борису Івановичу.

Роб. тел. +38(044) 241-5412.