

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

ВАБИЩЕВИЧ МАКСИМ ОЛЕГОВИЧ

УДК 539.3

**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ
КОЛИВАНЬ ПРОСТОРОВИХ ТІЛ ІЗ ТРИЩИНАМИ НА ОСНОВІ
НАПІВАНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

05.23.17 – будівельна механіка

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2013

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Солодей Іван Іванович,

Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, завідувач відділом НДІ БМ, професор кафедри будівельної механіки КНУБА

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Гондляр Олександр Володимирович,

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Сідяченко В'ячеслав Григорович,

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, старший науковий співробітник

Захист відбудеться «___» травня 2013 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04 при Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України за адресою: 03680, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, а. 319.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України за адресою: 03680, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий «24» квітня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н.



Д. В. Михайловський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Прагнення до збільшення терміну експлуатації відповідальних об'єктів сучасної техніки веде до використання конструктивних елементів і деталей при наявності в них тріщин. В багатьох випадках вони знаходяться під дією довільно розподілених у просторі і часі нестационарних динамічних навантажень різної тривалості. Визначення тріщиностійкості зазначених об'єктів є вирішальним фактором запобігання можливих аварійних ситуацій.

Зважаючи на технічні труднощі та високу вартість проведення натурних випробувань, вирішення зазначеної проблеми із залученням експериментальних методів є майже неможливим. У зв'язку з цим постає необхідність більш глибокого теоретичного вивчення особливостей поведінки таких конструкцій та створення відповідних чисельних засобів по визначенню динамічних параметрів механіки руйнування.

Багато вузлів та деталей, що нині використовуються в машинобудуванні, енергетиці та інших галузях техніки представляють собою просторові тіла обертання або призматичні тіла складної форми та структури поперечного перерізу. До них відносяться елементи демпферних пристроїв, посудини тиску, зразки для визначення динамічних параметрів механіки руйнування і т.і. Їх напружено-деформований стан є суттєво тривимірним. В той же час, аналіз відомих публікацій показує, що основними об'єктами дослідження механіки руйнування при динамічному навантаженні залишаються двовимірні тіла.

Найбільш поширений і універсальний чисельний метод для побудови моделей означеного класу об'єктів є напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ), на основі якого широко розглянуті підходи до визначення КІН в просторових задачах статички. Питання обчислення параметрів механіки руйнування при динамічному навантаженні на основі напіваналітичного метода скінченних елементів піднімаються вперше.

Таким чином, розробка та реалізація ефективних підходів моделювання пошкоджень типу тріщин та визначення на цій основі параметрів тріщиностійкості в задачах змішаного руйнування просторових тіл обертання та призматичних тіл під дією нестационарних навантажень різного рівня інтенсивності та тривалості у часі є актуальною проблемою будівельної механіки і представляє практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності до загального плану наукових досліджень кафедри будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури (КНУБА) і Науково-дослідного інституту будівельної механіки КНУБА (НДІБМ КНУБА) за темами: 3ДБ-2008 "Теоретичні основи і методики дослідження стійкості та руйнування просторових тонкостінних пружних систем" (2008-2010 №ДР 0105U001333) та 5ДБ-2012 за темою: "Розробка методів прогнозування процесів деформування та зон прогресуючого руйнування масивних будівельних конструкцій під дією статичного і динамічного навантаження" (2012-2013 №ДР 0112U001480) які виконувались за напрямками: «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі» та «Інформаційні та комунікаційні технології».

Автор брав безпосередню участь у виконанні цих науково-дослідних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення на основі напіваналітичного метода скінченних елементів ефективної методики визначення параметрів механіки руйнування в рамках перехідних динамічних процесів, що протікають в просторових призматичних тілах та тілах обертання із стаціонарними тріщинами і розв'язанні на цій основі нових прикладних задач.

Мета роботи досягається вирішенням наступних завдань:

- побудова розрахункових співвідношень НМСЕ для задач динаміки, що характеризуються високою швидкістю збіжності результатів та мінімальними чисельними витратами;
- розробка ефективних алгоритмів розв'язання великих систем лінійних рівнянь руху, що враховують структуру розрахункових рівнянь НМСЕ;
- розробка в межах НМСЕ процедури обчислення динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) прямим методом ;
- реалізація на основі НМСЕ методу обчислення динамічного J-інтеграла за величинами вузлових реакцій та переміщень, який забезпечує його інваріантність до контура інтегрування в дискретних моделях;
- реалізація розроблених алгоритмів на ПЕОМ у вигляді сучасного обчислювального комплексу програм;
- підтвердження вірогідності та ефективності розроблених алгоритмів при порівнянні з аналітичними або існуючими чисельними розв'язками;
- аналіз особливостей реальних процесів динамічного деформування, що протікають у складних конструкціях.

Об'єктом дослідження є процеси пружних нестационарних коливань просторових тіл обертання та призматичних тіл із тріщинами.

Предметом дослідження є стаціонарні тріщини та параметри механіки руйнування, що включають динамічний коефіцієнт інтенсивності напружень і J-інтеграл, обчислений з урахуванням сил інерції, особливості їх поведінки в умовах динамічного навантаження.

Методи дослідження. Апроксимація призматичних тіл та тіл обертання виконується із застосуванням напіваналітичного метода скінченних елементів. Напружено-деформований стан розглядається в термінах фізичних компонент тензорів напружень та деформацій. Рух системи неоднорідних тіл, описується на основі варіаційного принципу Гамільтона з початковими і граничними умовами. В силу замкнутості тіл обертання, постійності їх геометричних характеристик в кільцевому напрямку та для забезпечення виконання граничних умов для шарнірно опертих призматичних тіл визначення параметрів напружено-деформованого стану природно проводити за допомогою 2π - періодичних безперервних функцій, за які обираються ряди Фур'є. Чисельне інтегрування рівнянь руху по часовій координаті здійснюється за допомогою методів прямого інтегрування та на основі розкладу рішення за власними формами коливань. Формування системи розрахункових рівнянь НМСЕ виконується із застосуванням моментної схеми скінченних елементів (МССЕ), розв'язання якої на кожному кроці за часом здійснюється за допомогою методу блочних ітерацій з верхньою релаксацією. Для моделювання областей

тріщиноутворення пропонується спеціальний скінченний елемент з тріщиною (ССЕТ). Обчислення коефіцієнтів ефективної матриці жорсткості спеціальних скінченних елементів виконується по тим самим формулам, що і для звичайних СЕ, обмежуючись корекцією елементів матриць пружних сталей. Для визначення параметрів механіки руйнування застосовуються прямі (асимптотичні) і енергетичні методи. Вірогідність і збіжність отримуваних результатів досліджено шляхом розв'язання широкого кола тестових задач.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у створенні на основі напіваналітичного метода скінчених елементів ефективної математичної моделі для дослідження еволюції напружено-деформованого стану в задачах змішаного руйнування просторових тіл обертання та призматичних тіл з тріщинами під дією динамічних імпульсних навантажень.

При цьому:

- вперше на основі розробленого спеціального скінченого елемента з тріщиною отримано розрахункові співвідношення НМСЕ для моделювання тріщин в твердих тілах, що перебувають під впливом динамічного навантаження; отримані узагальнені матриці мас та жорсткості двох типів скінченних елементів, при наявності та відсутності в них тріщин;
- розроблено нові алгоритми визначення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень на основі прямого та енергетичного методів;
- вперше проведено узагальнення метода реакцій по обчисленню J -інтеграла за величинами вузлових реакцій та переміщень в задачах динаміки, що забезпечує його інваріантність до контура інтегрування в дискретних моделях і на цій основі створена методика обчислення складників J -інтеграла: J_I , J_{II} , та J_{III} , пов'язаних з тріщинами нормального відриву, поперечного та поздовжнього зсуву в задачах змішаного руйнування при динамічному навантаженні;
- отримано нові результати розв'язання просторових задач лінійної механіки руйнування для відповідальних конструкцій з тріщинами, що знаходяться під дією нестационарних динамічних навантажень.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні орієнтованого на персональні ЕОМ сучасного комплексу прикладних програм, що дозволяє проводити чисельні дослідження пружних нестационарних коливань призматичних тіл та тіл обертання з пошкодженнями типу тріщин в умовах динамічного навантаження. Розроблений підхід і програмне забезпечення впроваджені у Науково-дослідному інституті будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури при виконанні держбюджетних тем і можуть бути використані в проектно-конструкторських та наукових установах машинобудівної, енергетичної, будівельної і інших галузях народного господарства при розрахунках відповідальних елементів конструкцій.

Особистий внесок здобувача В дисертаційній роботі викладені результати теоретичних і чисельних досліджень отримані автором особисто: проведено огляд літературних джерел з питань сучасного стану проблеми [1, 3]; отримано розрахункові співвідношення НМСЕ для тіл обертання та призматичних тіл із тріщинами в умовах динамічного деформування [3, 4, 11], вирази для амплітудних узагальнених матриць мас, жорсткості та компонент векторів вузлових реакцій спеціального скінченного

елемента з тріщиною [5, 6]; розроблено нові алгоритми визначення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень на основі прямого та енергетичного методів [4, 8]; проведено обґрунтування ефективності та вірогідності представленого підходу і програмного забезпечення [10, 12]; встановлено особливості поведінки відповідальних об'єктів з пошкодженнями типу тріщина, що перебувають під дією нестационарних динамічних навантажень [9, 13].

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на:

Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос» (м. Дніпропетровськ, 2007), Міжнародній науковій конференції «Математичні проблеми технічної механіки» (м. Дніпродзержинськ, 2007), Міжнародній науково-технічній конференції пам'яті академіка НАН України В.І. Моссаковського «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій» (м. Дніпропетровськ, 2007), Міжнародній науково-практичній конференції «Розвиток наукових досліджень 2008» (м. Полтава, 2008), науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (Київ, 2007-2012 рр.).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалась на кафедрі будівельної механіки КНУБА (Київ, 2012р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 13 наукових працях, з них: у фахових наукових журналах і збірниках – 8; у публікаціях матеріалів міжнародних і вітчизняних конференцій та конгресів – 5

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Загальний обсяг дисертації становить 141 сторінку, у тому числі 115 сторінок основного тексту, 59 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел із 296 найменувань на 25 сторінках, додаток на одній сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтована актуальність теми, визначені мета і задачі досліджень, наведена загальна характеристика роботи.

У першому розділі на підставі огляду літературних джерел надана оцінка сучасного стану досліджень динамічної механіки руйнування та обґрунтовано напрямки досліджень.

Поява та становлення динамічної механіки руйнування пов'язані з працями вітчизняних та іноземних вчених: Н.А.Златіна, А.Г.Іванова, Б.В.Кострова, Є.М.Морозова, Л.В.Нікітіна, В.С.Нікіфоровського, В.З.Партона, Л.І.Слепяна, В.Е.Фортова, Г.П.Черепанова, Е.І.Шемякіна, І.Йоффі, Дж.Ахенбаха, К.Броберга, Дж.Деллі, Л.Фройнда, А.Мауе, Дж.Кальтхоффа, В.Кнаусса, А.Кобаяши, А.Розакіса, Г.Сі, Л.Шоки. Сучасні проблеми динамічної механіки руйнування, питання визначення параметрів тріщиностійкості конструкційних матеріалів знайшли своє відображення в монографіях В.Г. Борисковського, К.Б. Броберга, О.М. Гузя, Є.М.Морозова, В.В. Покровського, В.Т. Трощенко та інших.

Найбільш природнім і простим методом для опису сингулярностей в задачах дослідження стаціонарних тріщин в умовах динамічного навантаження є метод

скінченних елементів. Реалізації МСЕ для розв'язання задач механіки присв'ячені роботи С.Атлурі, В.Бронкса, О.В.Гондляха, Я.М.Григоренка, П.П.Гонтаровського, О.С.Городецького, Г.І.Львова, В.Н.Мазура, Ю.І.Немчинова; Г.П.Нікішкова, А.В.Перельмутера, О.С.Сахарова, М.Сіраторі, В.В.Харченка, М.Г.Шульженка та ін. Істотно поширити можливості МСЕ, в особливості для класу об'єктів, що розглядаються в даній роботі, завдяки урахуванню їх особливостей, дозволяє напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ), розвиток якого пов'язаний з працями П.О.Акімова, В.А.Баженова, О.І.Гуляра, О.Зенкевича, О.Б.Золотова, Б.Я.Кантора, Б.А.Куранова, В.А.Мерзлякова, Дж.Персі, Т.Піана, В.Г.Савченка, О.С.Сахарова, М.М.Шапошнікова, Ю.М.Шевченка.

Викладені вихідні співвідношення просторової задачі пружного деформування при динамічному навантаженні, показані особливості визначення параметрів механіки руйнування.

У другому розділі запропонована комбінація спеціального скінченного елемента з тріщиною (ССЕТ), як моделі із прямою корекцією тензора напружень звичайного СЕ, та алгоритма усереднення отриманих розв'язків по ефективній привершинній підобласті, що дозволяє зберегти регулярну структуру дискретної моделі і значно зменшити чисельні витрати. Важливою перевагою цього метода є те, що деформоване тіло з тріщиною апроксимується за допомогою повністю сумісних типів скінченних елементів. При цьому, обчислення коефіцієнтів ефективної матриці жорсткості спеціального скінченного елемента виконується по тим самим формулам, що і для звичайних СЕ, обмежуючись корекцією елементів матриць пружних сталей.

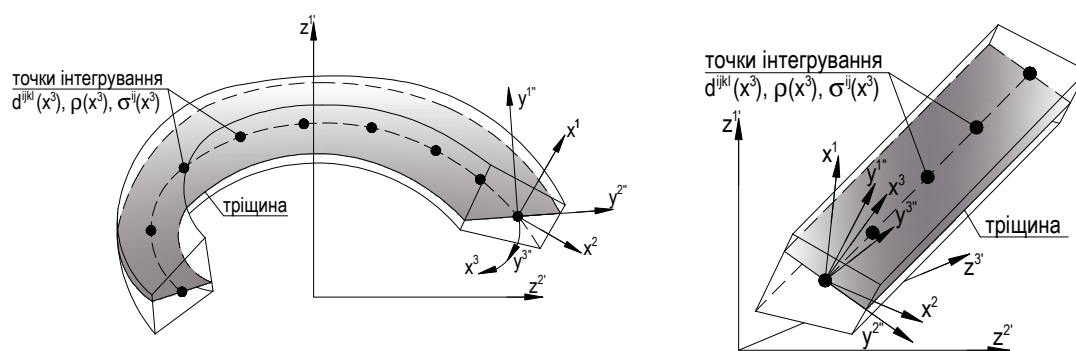
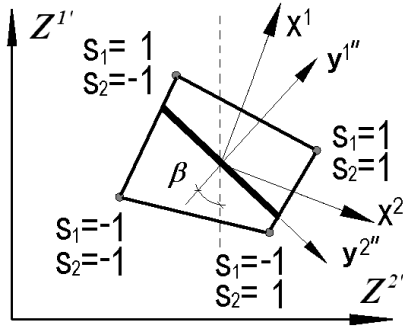


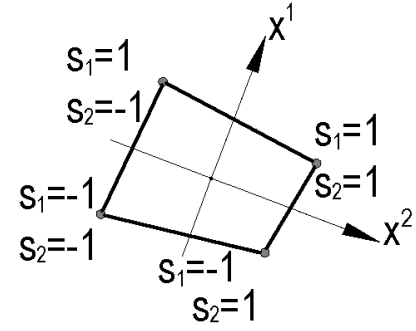
Рис. 1. Кільцевий замкнений та призматичний спеціальні СЕ з тріщиною

За невідомі обрані вузлові переміщення, швидкості та прискорення $(u : \dot{u} : \ddot{u})_{i'(s_1 s_2)}$ в базисній системі координат $Z^{i'}$, де індекси s_1 та s_2 визначають положення вузла відносно центра елемента і набувають значень ± 1 (рис. 2.). Для опису напружено-деформованого стану вводиться додаткова місцева система координат x^i , яка природно пов'язана з геометрією тіла.

Тріщина описується в ортогональній системі координат $y^{i''}$ (рис. 2) таким чином, що $y^{2''}$ проходить по дотичній до траєкторії тріщини, $y^{1''}$ - по нормалі та утворює з додатнім напрямком осі $Z^{1'}$ кут β (рис. 2).



а) СЕ при наявності тріщини



б) СЕ при відсутності тріщини

Рис. 2. Поперечний переріз спеціальних СЕ з тріщиною

Припускається, що щільність матеріалу ρ , компоненти тензора пружних постійних d^{ijkl} і визначник матриці компонент метричного тензора g незначно змінюються в області поперечного перерізу елемента і вважаються рівними відповідним значенням в його центрі:

$$\rho = \rho|_{x^\alpha=0}, \quad d^{ijkl} = d^{ijkl}|_{x^\alpha=0}, \quad \sqrt{g} = \sqrt{g}|_{x^\alpha=0}. \quad (1)$$

Напротивагу цьому компоненти метричного тензора і напруження довільно змінюються вздовж осі x^3 і обчислюються в необхідній кількості точок інтегрування.

За невідомі при розв'язанні задачі приймаються компоненти переміщень, швидкостей та прискорень вузлів СЕ в базисній системі координат $(u: \dot{u}: \ddot{u})_{k'}$, де k' - напрямок в базисній системі координат.

Якщо обмежитися білінійним розподілом переміщень, швидкостей і прискорень в площині перетину елемента і описати їх через вузлові значення поліномами Лагранжа першого ступеня:

$$P_{(s_1, s_2)} = \prod_{n=1}^2 \left(S_{(n)} x^{(n)} + \frac{1}{2} \right), \quad (2)$$

можна записати:

$$(u: \dot{u}: \ddot{u})_{k'} = \sum_{S_1} \sum_{S_2} P_{(S_1, S_2)} (u: \dot{u}: \ddot{u})_{k'(S_1, S_2)}. \quad (3)$$

Подання компонент тензорів деформацій і напружень на основі їх розкладу в ряд Маклорена, згідно моментної схеми скінчених елементів, виконано для їх фізичних значень. Це дозволяє врахувати змінність компонент метричного тензора в площині поперечного перетину.

$$\overset{\circ}{\epsilon}_{\alpha\alpha} = \overset{\circ}{\epsilon}_{\alpha\alpha} + \overset{\circ}{\epsilon}_{\alpha\alpha, (3-\alpha)} x^{(3-\alpha)}, \quad \overset{\circ}{\epsilon}_{12} = \overset{\circ}{\epsilon}_{12}, \quad (4)$$

$$\overset{\circ}{\epsilon}_{\alpha 3} = \overset{\circ}{\epsilon}_{\alpha 3} + \overset{\circ}{\epsilon}_{\alpha 3, (3-\alpha)} x^{(3-\alpha)}, \quad \overset{\circ}{\epsilon}_{33} = \overset{\circ}{\epsilon}_{33} + \overset{\circ}{\epsilon}_{33, \alpha} x^\alpha$$

$$\overset{\circ}{\sigma}^{\alpha\alpha} = \overset{\circ}{\sigma}^{\alpha\alpha} + \overset{\circ}{\sigma}^{\alpha\alpha}_{, (3-\alpha)} x^{(3-\alpha)}, \quad \overset{\circ}{\sigma}^{12} = \overset{\circ}{\sigma}^{12}, \quad (5)$$

$$\overset{\circ}{\sigma}^{\alpha 3} = \overset{\circ}{\sigma}^{\alpha 3} + \overset{\circ}{\sigma}^{\alpha 3}_{, (3-\alpha)} x^{(3-\alpha)}, \quad \overset{\circ}{\sigma}^{33} = \overset{\circ}{\sigma}^{33} + \overset{\circ}{\sigma}^{33}_{, \alpha} x^\alpha$$

При цьому використані наступні геометричні співвідношення:

$$\overset{\circ}{\varepsilon}_{kl} = B_{kl}^{k'(S_1, S_2)} u_{k'(S_1, S_2)}, \quad \overset{\circ}{\varepsilon}_{kl, \alpha} = B_{kl, \alpha}^{h k'(S_1, S_2)} u_{k'(S_1, S_2)} \quad (6)$$

Зв'язок між фізичними компонентами напружень та деформацій записується на основі закону Гука:

$$\overset{\circ}{\sigma}^{ij} = \overset{\circ}{d}^{ijkl} \overset{\circ}{\varepsilon}_{kl}, \quad \overset{\circ}{\sigma}_{, \alpha}^{ij} = \overset{\circ}{d}^{ijkl} \overset{\circ}{\varepsilon}_{kl, \alpha}, \quad (7)$$

Вважається, що на берегах тріщини, при умові її розкриття ($\varepsilon^{1''1''} > 0$), нормальні та дотичні напруження повинні дорівнювати нулю:

$$\sigma^{1''1''} = 0, \quad \sigma^{1''2''} = 0, \quad \sigma^{1''3''} = 0 \quad (8)$$

Розглядаються два випадки – з урахуванням контакту між берегами тріщини та за умови відсутності контактної задачі. При розгляді першого випадку при $\varepsilon^{1''1''} < 0$ забезпечуються умови непроникнення берегів тріщини та наявності сил тертя відповідно до закону Кулона.

Корекція тензора пружних констант матеріалу d^{mnst} в зоні тріщини проводиться згідно формули:

$$d_*^{mnst} = d^{mnst} - d_p^{mnst} - d_c^{mnst} - d_q^{mnst} \quad (9)$$

Вирази для їх обчислення, у відповідності до відомих формул тензорного аналізу мають вигляд:

$$d_p^{mnst} = C_{i''}^m C_{j''}^n C_{k''}^s C_{l''}^t d^{i''j''k''l''} d^{1''1''k''l''} / d^{1''1''1''1''} \quad (10)$$

$$d_c^{mnst} = 2C_{i''}^m C_{j''}^n C_{1''}^s C_{2''}^t d^{i''j''1''2''} \quad (11)$$

$$d_q^{mnst} = 2C_{i''}^m C_{j''}^n C_{1''}^s C_{3''}^t d^{i''j''1''3''} \quad (12)$$

де $C_{i''}^m$ - коефіцієнти перетворення, що визначають зв'язок між системою координат x^i та системою координат $y^{\alpha''}$:

$$C_{i''}^m = C_{k'}^m C_{i''}^{k'}, \quad C_{i''}^{k'} = \cos(Z^{k'} \wedge y^{i''}) \quad (13)$$

Якщо симетризувати вирази (11) та (12) і ввести позначення $r_{i''}^{ms} = C_{(i'')}^m C_{(i'')}^s$, можемо записати:

$$d_c^{mnst} = \mu(r_{1''}^{ns} r_{2''}^{mt} + r_{1''}^{ms} r_{2''}^{nt} + r_{1''}^{nt} r_{2''}^{ms} + r_{1''}^{mt} r_{2''}^{ns}), \quad (14)$$

$$d_q^{mnst} = \mu(r_{1''}^{ns} r_{3''}^{mt} + r_{1''}^{ms} r_{3''}^{nt} + r_{1''}^{nt} r_{3''}^{ms} + r_{1''}^{mt} r_{3''}^{ns}), \quad (15)$$

Подання невідомих вузлових переміщень, швидкостей та прискорень в напрямку x^3 для звичайних та спеціальних СЕ здійснюється з використанням тригонометричних рядів Фур'є.

$$(u: \dot{u}: \ddot{u})_{k'(S_1, S_2)} = \sum_{l=l_0}^L (u: \dot{u}: \ddot{u})_{k'(S_1, S_2)}^l \Psi_{(k')}^l \quad (16)$$

де для кільцевого СЕ: $\Psi_{1'}^l = \Psi_{2'}^l = \cos lx^3$, $\Psi_{3'}^l = \sin lx^3$, $l_0 = 0$, $0 \leq x^3 \leq 2\pi$

для призматичного СЕ: $\Psi_{1'}^l = \Psi_{2'}^l = \sin \frac{\pi l}{2} x^3$, $\Psi_{3'}^l = \cos \frac{\pi l}{2} x^3$, $l_0 = 1$, $0 \leq x^3 \leq 2$

Визначивши вузлові переміщення $u_{k'(S_1, S_2)}$ через амплітудні значення, використавши формули (6) та (4), після диференціювання по x^3 і перегрупування коефіцієнтів при $\psi_{1'}^l$ з позначкою $\mathring{\epsilon}$ і $\psi_{3'}^l$ з позначкою $\bar{\mathring{\epsilon}}$ отримаємо:

$$\mathring{\epsilon}_{ij} = \sum_{l=l_0}^L \mathring{\epsilon}_{ij}^l \psi_{1'}^l + \bar{\mathring{\epsilon}}_{ij}^l \psi_{3'}^l, \quad \mathring{\epsilon}_{ij, \alpha} = \sum_{l=l_0}^L \mathring{\epsilon}_{ij, \alpha}^l \psi_{1'}^l + \bar{\mathring{\epsilon}}_{ij, \alpha}^l \psi_{3'}^l, \quad (17)$$

Напруження і їх похідні подаються відрізками ряду Фур'є вздовж x^3 :

$$\mathring{\sigma}^{ij} = \sum_{l=l_0}^L \mathring{\sigma}_l^{ij} \psi_{1'}^l + \bar{\mathring{\sigma}}_l^{ij} \psi_{3'}^l, \quad \mathring{\sigma}_{, \alpha}^{ij} = \sum_{l=l_0}^L \mathring{\sigma}_{, \alpha l}^{ij} \psi_{1'}^l + \bar{\mathring{\sigma}}_{, \alpha l}^{ij} \psi_{3'}^l. \quad (18)$$

При цьому відмінні від нуля амплітудні компоненти тензора деформацій:

$$\mathring{\epsilon}_{11}^l, \mathring{\epsilon}_{12}^l, \mathring{\epsilon}_{22}^l, \mathring{\epsilon}_{33}^l, \mathring{\epsilon}_{23}^1, \mathring{\epsilon}_{13}^l, \mathring{\epsilon}_{(3-\alpha)(3-\alpha), \alpha}^l, \mathring{\epsilon}_{33, \alpha}^l, \mathring{\epsilon}_{(3-\alpha)3, \alpha}^l; \text{ та тензора напружень:}$$

$$\mathring{\sigma}_l^{11}, \mathring{\sigma}_l^{12}, \mathring{\sigma}_l^{22}, \mathring{\sigma}_l^{33}, \mathring{\sigma}_l^{23}, \mathring{\sigma}_l^{13}, \mathring{\sigma}_{, \alpha l}^{(3-\alpha)(3-\alpha)}, \mathring{\sigma}_{, \alpha l}^{33}, \mathring{\sigma}_{, \alpha l}^{(3-\alpha)3}.$$

Для однорідних вздовж x^3 тіл амплітудні значення напружень та їх похідних в центрі поперечних перерізів СЕ можуть бути отримані безпосередньо через амплітудні значення деформацій і їх похідних:

$$\mathring{\sigma}_l^{ij} = d^{ijkm} \mathring{\epsilon}_{km}^l, \quad \mathring{\sigma}_{, \alpha l}^{ij} = d_{\alpha}^{ijkm} \mathring{\epsilon}_{km, \alpha}^l, \quad \bar{\mathring{\sigma}}_l^{ij} = d^{ijkm} \mathring{\epsilon}_{km}^l, \quad \bar{\mathring{\sigma}}_{, \alpha l}^{ij} = d_{\alpha}^{ijkm} \mathring{\epsilon}_{km, \alpha}^l. \quad (19)$$

Визначення амплітудних узагальнених матриць жорсткості обох типів СЕ здійснюється на основі виразу для варіації потенційної енергії:

$$\delta W = \iiint_{x^1 x^2 x^3} \mathring{\sigma}^{ij} \delta \mathring{\epsilon}_{ij} \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3 \quad (20)$$

Після декількох чисельних перетворень та виконання інтегрування за напрямком x^3 для узагальненої амплітудної матриці жорсткості обох СЕ отримаємо наступний вираз:

$$[K]_{ll} = \left[\sum_{\beta=1}^2 [B_{\beta}]_l^T [D_{\beta}] [B_{\beta}]_l + \frac{1}{12} \sum_{\alpha=1}^2 [B_{\beta}^h]_{\alpha l}^T [D_{\beta}]_{\alpha} [B_{\beta}^h]_{\alpha l} \right] \sqrt{g} \quad (21)$$

де $[B_{\beta}]_l^T$, $[B_{\beta}^h]_{\alpha l}^T$ - матриці диференціювання; $[D_{\beta}]$, $[D_{\beta}]_{\alpha}$ - матриці пружних сталей.

При загальному підході варіація кінетичної енергії скінченного елемента в місцевій системі координат описується співвідношенням:

$$\delta T = - \int \int \int_{x^1 x^2 x^3} \rho \dot{u}^{k'} \delta u_{k'} \sqrt{g} dx^1 dx^2 dx^3 \quad (22)$$

Використавши припущення про осереднення маси біля вузла, що розглядається, враховуючи, що кожна вузлова маса відповідає частині мас елементів, які примикають до даного вузла, перепишемо варіацію кінетичної енергії в амплітудній формі:

$$\delta T = \sum_{l=l_0}^L \delta T_l \quad (23)$$

де

$$\delta T_l = \frac{1}{4} \rho u_{k'}^l(s_1, s_2) \delta u_{k'}^l(s_1, s_2) g_{(s_1, s_2)}^{kk'} \sqrt{g} \quad (24)$$

Тоді вираз для амплітудної матриці мас матиме вигляд:

$$[M]_{ll} = \frac{1}{4} \rho \sqrt{g} [g^{kk'}], \quad (25)$$

Інтегрування рівнянь руху за часом виконується за допомогою двох відомих підходів: метода Н'юмарка та розкладу розшукуваного рішення за формами власних коливань, модифікації яких записуються в амплітудних підсистемах напіваналітичного метода скінченних елементів

У третьому розділі описані алгоритми обчислення параметрів динамічної механіки руйнування та наведені розв'язки тестових прикладів, які підтверджують ефективність запропонованих підходів.

Отримавши амплітудні переміщення та напруження згідно розроблених алгоритмів, запишемо формули для обчислення амплітудних значень КІН для кожної з амплітудних підсистем НМСЕ:

$$\begin{aligned} \overset{\sigma}{K}_I^l(t) &= \frac{\overset{\sigma}{\delta}_I^{1''1''} \Psi_{1'}^l}{\overset{\sigma}{H}_I^{1''1''}(r, \theta)}; \quad \overset{\sigma}{K}_{II}^l(t) = \frac{\overset{\sigma}{\delta}_I^{2''2''} \Psi_{1'}^l}{\overset{\sigma}{H}_{II}^{2''2''}(r, \theta)}; \quad \overset{\sigma}{K}_{III}^l(t) = \frac{\overset{\sigma}{\delta}_I^{1''3''} \Psi_{3'}^l}{\overset{\sigma}{H}_{III}^{1''3''}(r, \theta)} \\ \overset{u}{K}_I^l(t) &= \frac{u_{1'}^l \Psi_{1'}^l}{\overset{u}{H}_I^{1''}(r, \theta)}; \quad \overset{u}{K}_{II}^l(t) = \frac{u_{2'}^l \Psi_{1'}^l}{\overset{u}{H}_{II}^{2''}(r, \theta)}; \quad \overset{u}{K}_{III}^l(t) = \frac{u_{3'}^l \Psi_{3'}^l}{\overset{u}{H}_{III}^{3''}(r, \theta)}, \end{aligned} \quad (26)$$

де $\overset{\sigma}{H}_I^{1''1''}(r, \theta)$, $\overset{\sigma}{H}_{II}^{2''2''}(r, \theta)$, $\overset{\sigma}{H}_{III}^{1''3''}(r, \theta)$, $\overset{u}{H}_I^{1''}(r, \theta)$, $\overset{u}{H}_{II}^{2''}(r, \theta)$, $\overset{u}{H}_{III}^{3''}(r, \theta)$ - відомі функції асимптотичних формул компонент тензорів напружень і переміщень.

Координатні величини визначаються за формулами :

$$\overset{\sigma}{K}_\zeta(t) = \sum_{l=l_0}^L \overset{\sigma}{K}_\zeta^l(t), \quad \overset{u}{K}_\zeta(t) = \sum_{l=l_0}^L \overset{u}{K}_\zeta^l(t), \quad \zeta = I, II, III \quad (27)$$

Кінцеве розрахункове значення КІН обчислюється згідно формули:

$$K_\zeta^l(t) = \frac{1}{2} \left(\overset{\sigma}{K}_\zeta^l(t) + \overset{u}{K}_\zeta^l(t) \right), \quad K_\zeta(t) = \sum_{l=l_0}^L K_\zeta^l(t) \quad (28)$$

Окрім прямого метода визначення параметрів механіки руйнування використовується енергетичний підхід, який базується на визначенні J - інтеграла по деякій замкненій області:

$$G_k = J_k(t) = \int_{\Gamma} \left[(W + T) n_k - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x^k} \right] d\Gamma \quad (29)$$

Традиційно для обчислення J - інтеграла в межах сіткових методів використовується формулювання:

$$J = \sum_{j=1}^{N_3} (W + T)_\alpha ds_j - \sum_{j=1}^{N_1} (W + T)_\alpha ds_j - \sum_{j=1}^{N_1} \left(n_i \sigma^{ik} \zeta_{k\alpha} \right) ds_j -$$

$$-\sum_{j=1}^{N_2} (n_i \sigma^{ik} \zeta_{k\alpha}) ds_j - \sum_{j=1}^{N_3} (n_i \sigma^{ik} \zeta_{k\alpha}) ds_j - \sum_{j=1}^{N_4} (n_i \sigma^{ik} \zeta_{k\alpha}) ds_j \quad (30)$$

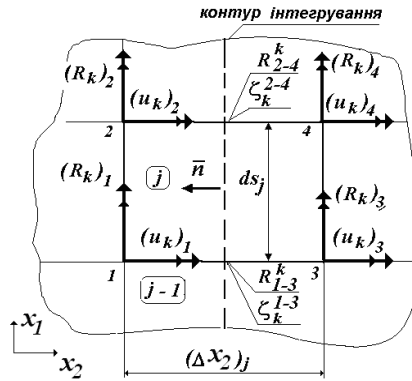


Рис. 3. Методика обчислення J – інтеграла

Вважається, що тріщина пов'язана з системою координат x^α (рис. 3.), де індекс α визначає повздовжній напрямок тріщини, N_j - сторони вибраного контуру інтегрування. В даній роботі для обчислення значень J - інтеграла використовується методика, розвинена в роботах О.С.Сахарова для тіл с тріщинами, що знаходяться під дією статичного навантаження (метод реакцій), у відповідності до якої всі члени, які входять до (30), визначаються за допомогою амплітудних вузлових реакцій та переміщень сіткової області для моменту часу $\tau = t + \Delta t$:

$$(W^l + T^l) dS_j = \frac{\{u\}_{lj}^T \{R\}_{lj}}{2(\Delta x_\alpha)_j}, R_{l2-4}^k = \frac{n_i \sigma_{l2-4}^{ik} dS}{2}, R_{l1-3}^k = \frac{n_i \sigma_{l1-3}^{ik} dS}{2}$$

$$R_{l2-4}^k = \frac{1}{2} (R_{l2}^k + R_{l4}^k), \left(\frac{\partial u_{li}}{\partial x^k} \right)_{2-4} = \frac{1}{\Delta x_\alpha} (u_{l4}^k - u_{l2}^k)$$

$$R_{l1-3}^k = \frac{1}{2} (R_{l1}^k + R_{l3}^k), \left(\frac{\partial u_{li}}{\partial x^k} \right)_{1-3} = \frac{1}{\Delta x_\alpha} (u_{l3}^k - u_{l1}^k) \quad (31)$$

J - інтеграл представляється через його амплітудні значення, тобто:

$$J_k = \sum_{l=l_0}^L J_k^l \quad (32)$$

При використанні інваріантності J - інтеграла відносно контуру інтегрування, даний підхід дозволяє значно скоротити кількість математичних операцій при його обчисленні в межах сіткових методів .

Формули для обчислення амплітудних значень вузлових реакцій залежать від алгоритму розв'язання рівнянь руху. Так при використанні методу Н'юмарка:

$$\{R\}_l^\tau = \{R_w\}_l^{t+\Delta t} + \{R_\rho\}_l^{t+\Delta t} - \{R_\rho\}_l^t \quad (33).$$

У випадках, коли динамічний розв'язок задачі формується на основі невеликої кількості перших власних форм конструкції, для розв'язання системи звичайних диференціальних лінійних рівнянь руху дискретної моделі використовують чисельний

підхід заснований на розкладі розшукуваного рішення по формам власних коливань конструкції. Вузлові реакції, при цьому, обчислюються за формулою:

$$\{R\}_l^\tau = \{R_w\}_l^\tau - \{R_p\}_l^\tau \quad (34)$$

На основі задачі про динамічний розтяг прямокутної пластини з центральною тріщиною проведено дослідження збіжності результатів розрахунку при використанні енергетичного та прямого підходів (рис. 4) для різних розмірів привершинної сіткової області та різних довжин тріщин.

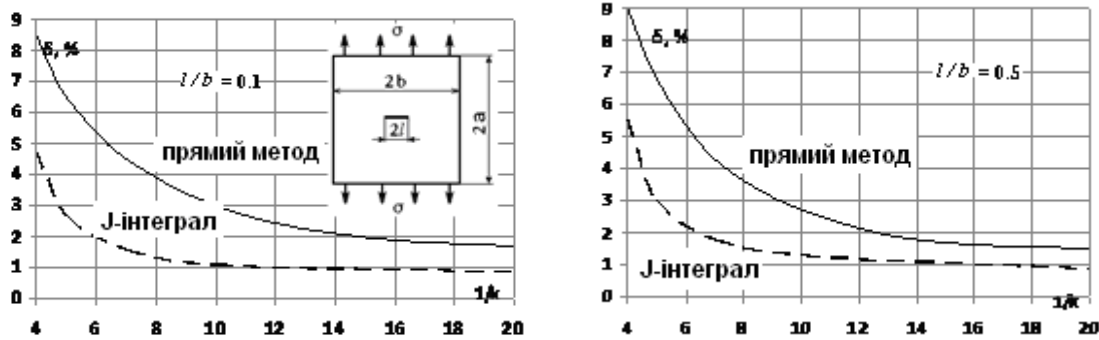


Рис. 4. Графіки збіжності ДКІН при використанні енергетичного та прямого методів

У випадку регулярної в напрямку Z^2 , скінченоелементної сітки доведена рівність нулю величини J-інтеграла, обчисленого по замкненому контуру.

Для визначення складників J_I , J_{II} , та J_{III} , пов'язаних з тріщинами нормального відриву, поперечного та поздовжнього зсуву, J-інтеграл, що охоплює тріщину, може бути поданий як сума J інтегралів. Розглянемо контур $CABDD'B'A'C'$ (рис. 5).

$$J = \sum_{l=l_0}^L J^l, \quad J_{CABDD'B'A'C'}^l = J_{CABD}^l + J_{C'A'B'D'}^l \quad (35)$$

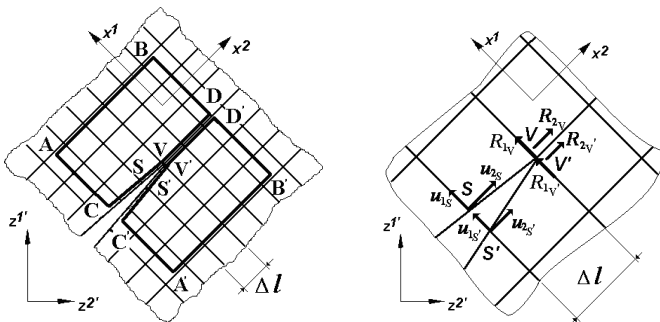


Рис. 5. Обчислення J- інтеграла при змішаному руйнуванні

$$J^l = J_I^l + J_{II}^l + J_{III}^l = \frac{1}{2\Delta l} \left(R_{1V}^l (u_{1S}^l - u_{1S'}^l) + R_{2V}^l (u_{2S}^l - u_{2S'}^l) + R_{3V}^l (u_{3S}^l - u_{3S'}^l) \right) \quad (36)$$

Наведений підхід дозволяє обґрунтувати використання тотожної формули, що отримана на основі методу віртуального закриття тріщини.

Зв'язок з відповідними значеннями КІН визначається за формулами:

$$K_I = \sqrt{J_I E/k}, \quad K_{II} = \sqrt{J_{II} E/k}, \quad K_{III} = \sqrt{2\mu J_{III}} \quad (37)$$

де $k = 1$ для плоского напруженого стану; $k = 1 - \nu^2$ за умови плоскої деформації.

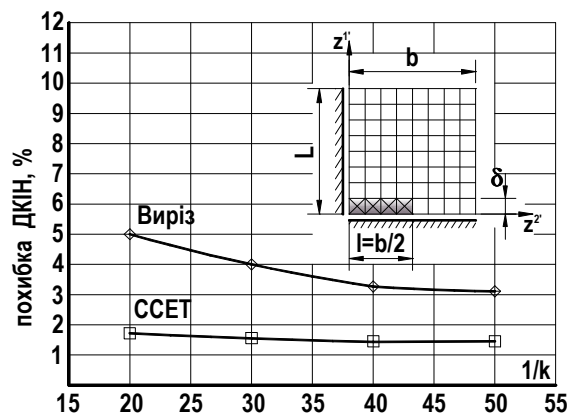
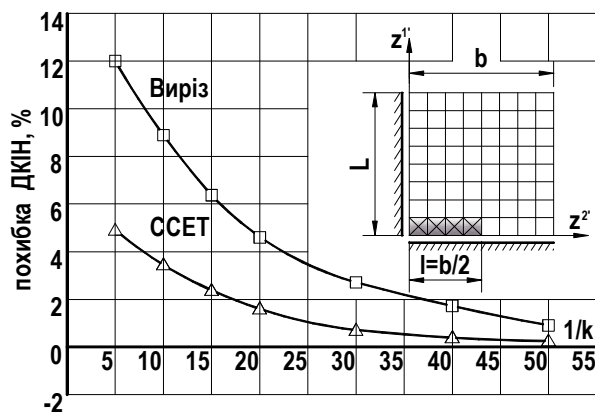


Рис. 6. Графіки збіжності результатів розрахунку K_{dI}

Порівняння збіжності параметрів механіки руйнування при згущенні сіткової області проведено на прикладі розтягу квадратної пластини з центральною тріщиною. Приведені графіки збіжності результатів розрахунку динамічного КІН (рис.6) при апроксимації тріщини спеціальними скінченими елементами та скінченими елементами нульової жорсткості. Як видно, точність обчислення динамічного КІН із застосуванням спеціальних скінчених елементів з тріщиною приблизно в два з половиною рази вища навіть при зменшенні розмірів звичайних елементів вдвічі.

Дослідження вірогідності та ефективності представленої методики проведено на основі двох типів запропонованих алгоритмів інтегрування руху за часом. Розв'язано задачу про розтяг пластини з центральною тріщиною із застосуванням прямих методів інтегрування рівнянь руху.

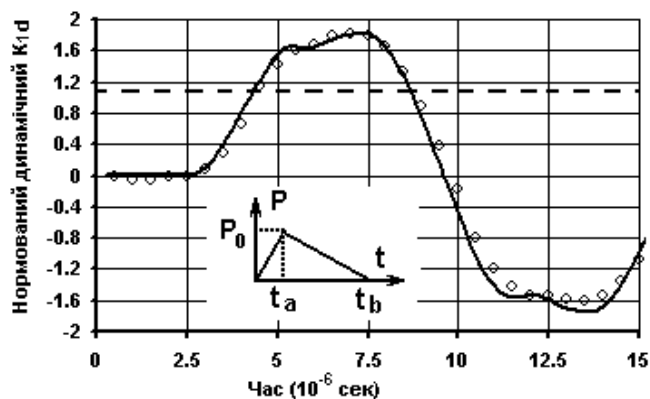
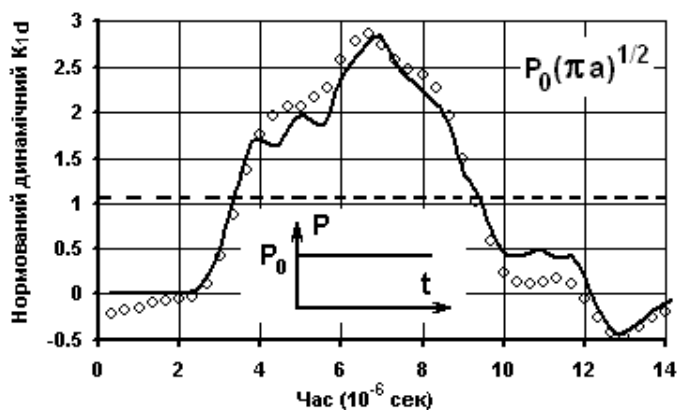


Рис. 7. Графіки зміни нормованого ДКІН у часовому масштабі

Результати аналізу еволюції нормованого динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень під дією миттєво прикладеного навантаження та навантаження у вигляді функції імпульса тиску, що має профіль трикутника представлені на графіках (рис.7). Помітна добра збіжність представлених кривих не тільки за амплітудою K_{1d} (менше ніж 2%÷3% за максимальним значенням) але і за періодом коливань.

Проведено розрахунок пластин з похилою тріщиною, що знаходяться під дією рівнорозподіленого розтягуючого тиску (рис. 8). На графіках (рис.9) представлено еволюцію нормованих динамічних K_{Id} та K_{II_d} у часі. У всіх випадках помітна добра збіжність результатів, отриманих з використанням запропонованих методик (суцільна лінія) з результатами робіт інших дослідників (кружки) не тільки за амплітудою, але і за періодом коливань.

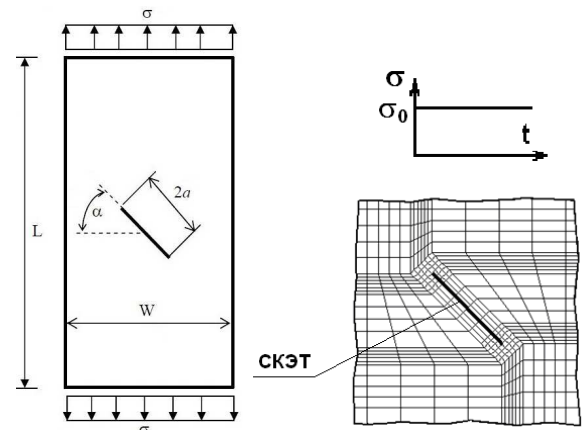
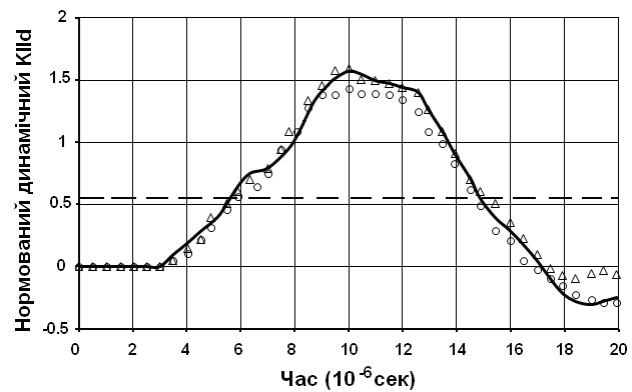
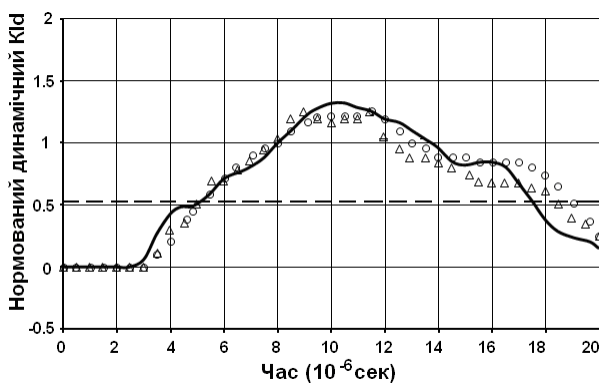


Рис. 8. Задача про динамічний розтяг пластини з похилою тріщиною



а)

б)

Рис. 9. Динамічні KI_d (а) та KII_d (б) для пластини з похилою тріщиною

Дослідження вірогідності обчислення динамічного КІН в просторових призматичних тілах та тілах обертання проведено на прикладі порівняння розв'язків, отриманих з використанням сучасних обчислювальних комплексів та за допомогою представлених методик.

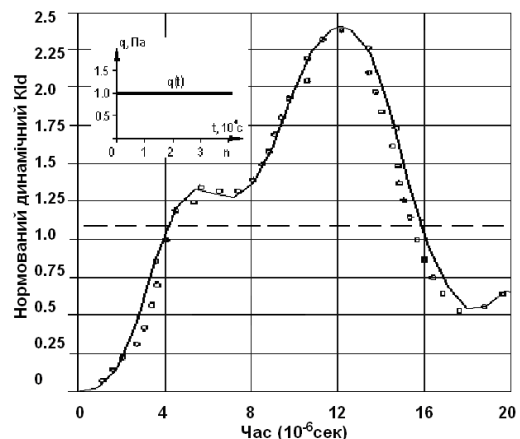
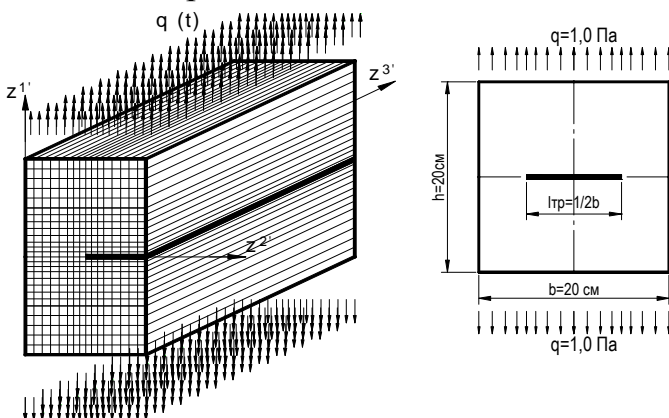


Рис. 10. Просторовий призматичний зразок Рис.11. Еволюція у часі нормованого KI_d

Об'єкти дослідження – просторове призматичне тіло, квадратного перерізу з центральною поздовжньою тріщиною (рис. 10) та тонкостінний циліндр з кільцевою тріщиною (рис. 12). На рис. 11, 14 показано еволюцію нормованих динамічних KI_d

(суцільна лінія) у порівнянні з результатами, отриманими при визначенні НДС за допомогою NASTRAN (кружки).

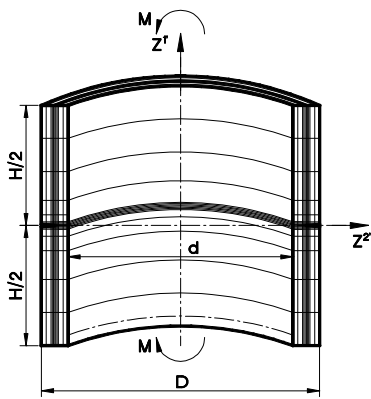


Рис. 12. Тонкостінний циліндр з кільцевою тріщиною

Як видно з графіків (рис. 11, 13, 14) збіжність результатів знаходиться в межах 1.5-2.0%.

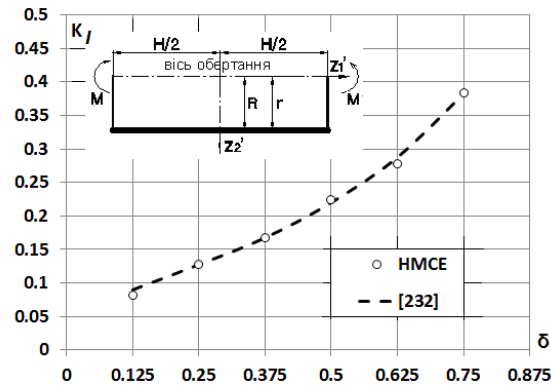


Рис. 13. Графік зміни максимальних значень КІН

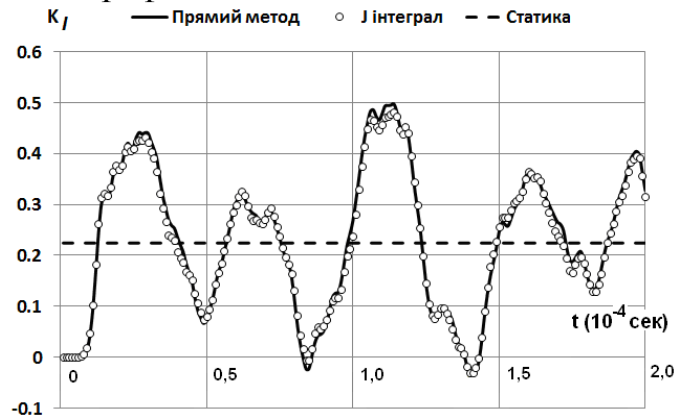


Рис. 14. Еволюція ДКІН у часі

У четвертому розділі наведена демонстрація можливостей підходу на прикладі дослідження динамічного деформування ємкості високого тиску, що являє собою тіло обертання з кільцевою тріщиною під впливом рівномірно розподіленого по внутрішній поверхні імпульсного навантаження (рис.15).

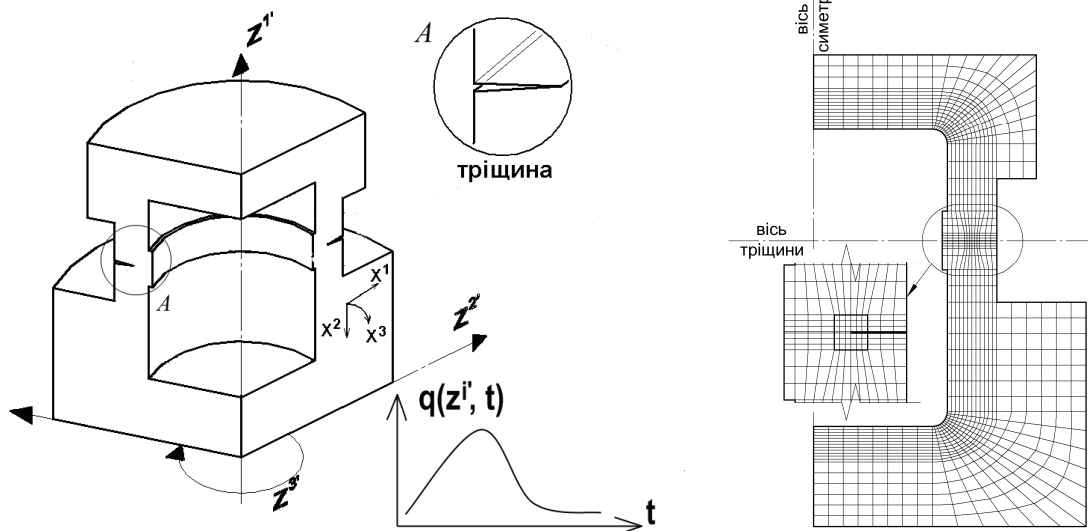


Рис. 15. Розрахункова схема ємкості високого тиску

Еволюція динамічного КІН у часі представлена для двох характерних швидкостей приросту навантаження (див. рис. 16). Видно, що величини динамічного

КІН, обчислені при відносних швидкостях 8.5 та 10 приблизно на 50 та 100% відповідно вищі за статичний КІН. Графіки максимальних динамічних КІН в залежності від довжини тріщини також представлені для різних швидкостей навантаження.

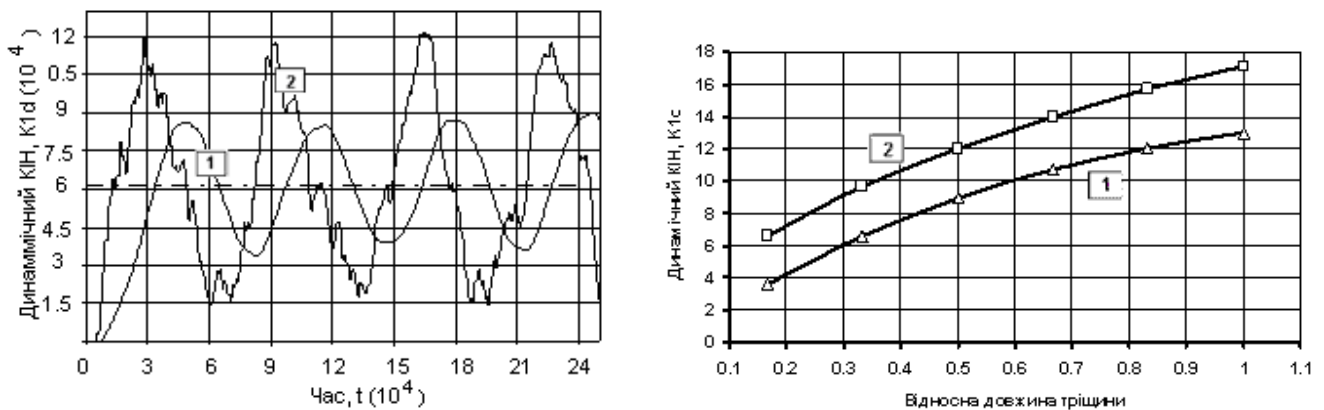


Рис.16. Еволюція ДКІН у часі та значення максимальних ДКІН для різних довжин тріщини

На прикладі демпферного пристрою наглядно проявляється зручність використання розробленого призматичного скінченного елемента для розрахунку просторових тіл. Демпферний пристрій (рис. 17) являє собою складну коробчасту конструкцію посилену двома повздовжніми ребрами.

З результатами статичного розрахунку максимальні розтягуючі напруження розташовані у протилежних шарах матеріалу верхньої кришки (області С і D). Виходячи з проведеного аналізу можна припустити, що області С і D є найбільш ймовірними місцями виникнення тріщин в умовах багаторазового динамічного навантаження.

Розглянемо модель із тріщиною довжиною $l_{cr} = 0.25\delta_1$, яка розташована в області С (рис. 17). Апроксимація тіла тріщини виконується за допомогою спеціальних скінчених елементів з тріщиною.

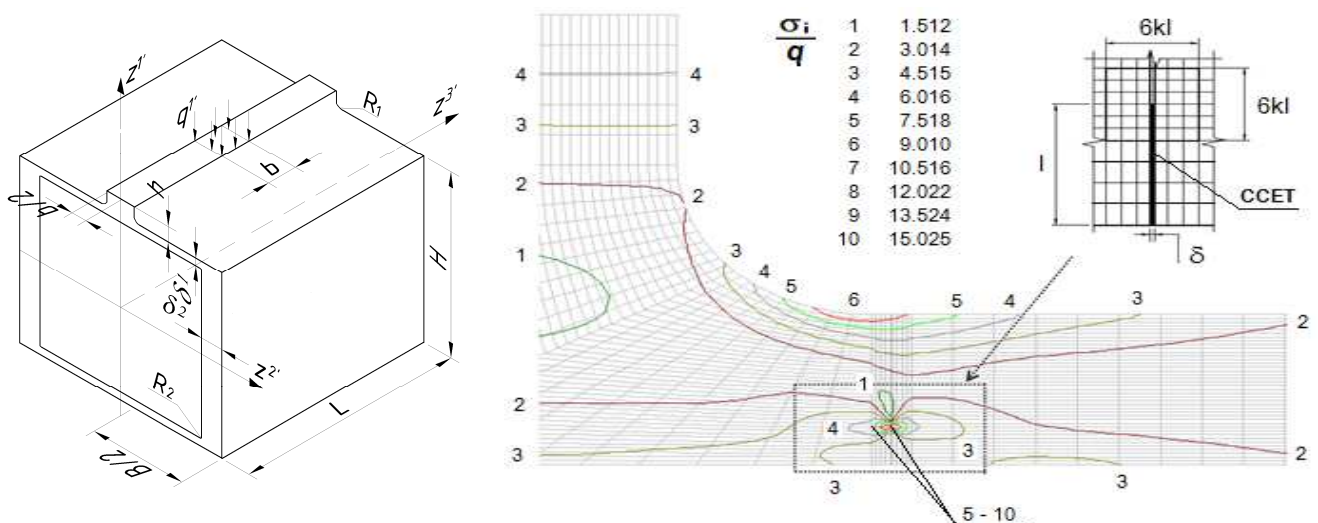


Рис. 17. Демпферний пристрій. Модель із тріщиною

Обчислення КІН проводилося двома методами: прямим (ліній) та на основі енергетичного підходу (метод реакцій, марки). Результати показані на рис. 18 у вигляді нормованих значень динамічного КІН K_{ζ}/q .

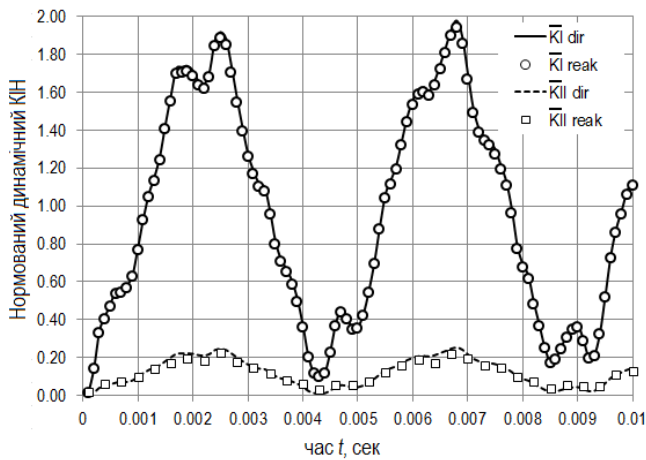


Рис. 18. Еволюція динамічного КІН

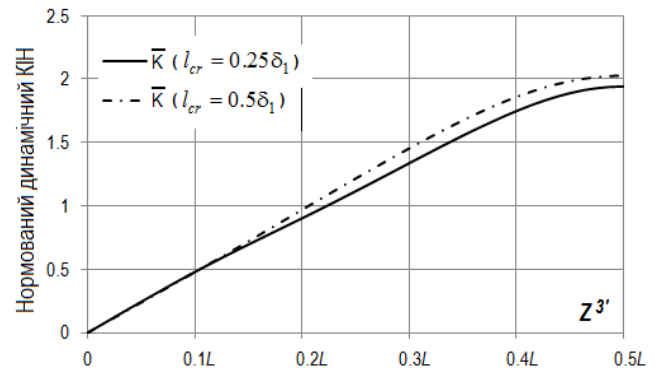


Рис. 19. Розподіл ДКІН вздовж твірної

Коефіцієнт інтенсивності напружень другого роду K_{II} (пунктирна лінія, квадрати) складає приблизно 10÷12% від K_I (суцільні лінія, кружки). Рис. 19 відображає розподіл динамічного КІН $\tilde{K} = \sqrt{K_I^2 + 1.78K_{II}^2}$ вздовж напрямку Z^3 в момент часу $t = 2.5 \times 10^{-3}$ сек для двох довжин тріщин $l_{cr} = 0.25\delta_1$ (суцільна лінія) та $l_{cr} = 0.5\delta_1$ (пунктир).

ВИСНОВКИ

Основні результати, отримані в роботі полягають у наступному:

На основі напіваналітичного метода скінченних елементів розроблено ефективну математичну модель для дослідження еволюції напружено-деформованого стану в задачах змішаного руйнування просторових тіл обертання та призматичних тіл з тріщинами під дією динамічних імпульсних навантажень.

В процесі роботи отримані наступні результати:

1. Проведено аналіз сучасного стану поставленої проблеми;
2. Отримана узагальнена матриця жорсткості двох типів скінченних елементів, при наявності та відсутності в них тріщини;
3. Розроблено нові алгоритми визначення динамічних коефіцієнтів інтенсивності напружень на основі прямого та енергетичного методів;
4. Створена методика обчислення складників J-інтеграла II, III, та III пов'язаних з тріщинами нормального відриву, поперечного та поздовжнього зсуву в задачах змішаного руйнування;
5. Запропонований підхід реалізовано у вигляді пакета прикладних програм, що орієнтований на сучасні ПЕОМ;
6. Вірогідність отриманих результатів і ефективність методики підтверджені розв'язанням широкого кола контрольних прикладів. При вирішенні нових задач вірогідність забезпечується послідовним згущенням сіткової області, зменшенням

кроку інтегрування рівнянь руху за часом та збільшенням кількості залучених власних форм для розкладу невідомих;

7. Проведено аналіз поведінки відповідальних конструкцій з тріщинами, що знаходяться під дією нестационарних динамічних навантажень. Встановлені закономірності динамічного деформування ємності високого тиску з кільцевою тріщиною різної довжини. Досліджено розвиток у часі динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень повздовжньої тріщини демпферного пристрою, що викликаний локальним імпульсним навантаженням.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Вабіщевич М.О. Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень призматичних тіл з тріщинами при дії динамічного навантаження / Вабіщевич М.О., Сахаров О.С., Солодей І.І. // Опір матеріалів і теорія споруд. – К.:КНУБА, Вип.78, 2006.-с.61-76.
2. Гуляр О.І. Дослідження вимушених коливань просторових неоднорідних призматичних тіл з тріщинами // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Гуляр О.І., Солодей І.І., Вабіщевич М.О. // Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип.71.-с.170-177.
3. Особливості обчислення коефіцієнтів інтенсивності напружень при динамічному навантаженні / В.А. Баженов, О.І. Гуляр, І.І. Солодей, М.О. Вабіщевич // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2008. - Вип.82. - С. 39-46.
4. Обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень в нестационарних задачах динаміки просторових тіл на основі енергетичного підходу / Солодей І.І., Вабіщевич М.О., Гуляр О.І., Сахаров О.С. // Опір матеріалів і теорія споруд. – К.:КНУБА, Вип.83, 2009.-с.93-109.
5. Солодей І.І. Розв'язання нестационарних задач механіки руйнування на основі апроксимації тріщини спеціальними скінченими елементами / О.І. Гуляр, І.І. Солодей, М.О. Вабіщевич // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2009. - Вип.84. - С.24-33.
6. Узагальнена матриця мас напіваналітичного метода скінченних елементів в задачах динаміки просторових конструкцій / Солодей І.І., Гуляр О.І., Вабіщевич М.О., Приходько А.Ю., Сізевич Б.І. // Опір матеріалів і теорія споруд. –К.:КНУБА, Вип.86, 2010.-с.47-55.
7. Визначення динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень в задачах змішаного руйнування на базі напіваналітичного метода скінченних елементів / Баженов В.А., Солодей І.І., Вабіщевич М.О., Гуляр О.І. // Опір матеріалів і теорія споруд. –К.:КНУБА, Вип.88, 2011.-с.3-11.
8. Баженов В.А. Визначення параметрів механіки руйнування для тіл обертання в нестационарних задачах механіки / В.А. Баженов, І.І. Солодей, М.О. Вабіщевич // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна – 2011. Вип. 39,.-с 7-12.
9. Обчислення коефіцієнтів інтенсивності напружень в тілах обертання з тріщинами при дії динамічного навантаження / Баженов В.А., Гуляр О.І., Солодей І.І., Вабіщевич М.О. // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції пам'яті академіка НАН України В.І. Моссаковського

- «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій» Дніпропетровський національний університет, м. Дніпропетровськ, 17-19 жовтня 2007р. с.232-234.
10. Напіваналітичний метод скінчених елементів в задачах визначення КІН призматичних тіл з тріщинами при дії динамічного навантаження / Баженов В.А., Гуляр О.І., Сахаров О.С., Солодей І.І., Вабіщевич М.О. // Матеріали міжнародної наукової конференції "Математичні проблеми технічної механіки - 2007" м. Дніпродзержинськ, 23-26 квітня 2007р., с.91-92.
 11. Солодей І.І. Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень призматичних тіл з тріщинами при дії динамічного навантаження / Солодей І.І., Вабіщевич М.О. // Збірник тез ІХ міжнародної молодіжної науково-практичної конференції «Людина і космос», м. Дніпропетровськ, 18-20 квітня 2007р.- с.275.
 12. Вабіщевич М.О. Ефективність визначення параметрів лінійної механіки руйнування призматичних тіл та тіл обертання в умовах динамічного навантаження / М.О. Вабіщевич // Наукова конференція молодих вчених, аспірантів і студентів КНУБА., 2007 р. : тези доповідей. – К., 2007. – С. 23.
 13. Солодей І.І. Дослідження параметрів механіки руйнування при різних швидкостях зростання динамічного навантаження / І.І. Солодей, М.О. Вабіщевич // „Розвиток наукових досліджень ‘2008” : Матеріали четвертої міжнар. наук.-практ. конф., 24–26 листоп. 2008 р. : зб. тез. – Полтава : Вид-во „ІнтерГрафіка”, 2008. – Т. 6. – С. 70–71

АНОТАЦІЯ

Вабіщевич М.О. Чисельне моделювання пружних нестационарних коливань просторових тіл із тріщинами на основі напіваналітичного методу скінчених елементів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка. – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Київ, 2012

В дисертації на основі напіваналітичного методу скінчених елементів розроблено ефективний підхід моделювання пошкоджень типу тріщин, а також алгоритми визначення параметрів тріщиностійкості в задачах руйнування просторових тіл обертання і призматичних тіл під дією нестационарних навантажень різного рівня інтенсивності та тривалості у часі. Викладені теорія та особливості обчислення параметрів механіки руйнування на основі енергетичного підходу із використанням спеціальних призматичного та кільцевого скінчених елементів з тріщиною в умовах динамічних навантажень. Створено програмне забезпечення для автоматизованого розв'язування динамічних задач механіки руйнування.

Представлені результати досліджень достовірності та ефективності використання напіваналітичного методу скінчених елементів при обчисленні параметрів механіки руйнування в задачах динаміки. Проведено аналіз впливу апроксимації тріщини спеціальними скінченими елементами на точність обчислення

параметрів механіки руйнування. Розглянуто прямий метод обчислення КІН у порівнянні з енергетичним підходом на основі J – інтеграла. Досліджено достовірність використання метода реакцій в задачах динаміки для різних схем інтегрування рівнянь руху за часом. Розв'язані тестові задачі обчислення динамічного КІН для задач змішаного руйнування. Демонстрація можливостей підходу проведена на прикладі дослідження динамічного деформування ємності високого тиску з кільцевою тріщиною та демпферного пристрою з поздовжньою тріщиною.

Ключові слова: динаміка, тріщина, динамічний коефіцієнт інтенсивності напружень, J -інтеграл, призматичні тіла, тіла обертання, напіваналітичний метод скінчених елементів.

АННОТАЦІЯ

Вабищевич М.О. Численное моделирование упругих нестационарных колебаний пространственных тел с трещинами на основе полуаналитического метода конечных элементов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 – строительная механика. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, Киев, 2012.

В диссертации на основе полуаналитического метода конечных элементов разработан эффективный подход моделирования поврежденных типа трещин, а также алгоритмы определения параметров трещиностойкости в задачах разрушения пространственных тел вращения и призматических тел под действием нестационарных нагрузок различной степени интенсивности и продолжительности во времени. Изложены теория и особенности вычисления параметров механики разрушения на основе энергетического подхода с использованием специальных призматического и кольцевого конечных элементов с трещиной в условиях динамической нагрузки. Проведенный анализ эффективности предложенных алгоритмов.

Представлены результаты исследований достоверности и эффективности использования полуаналитического метода конечных элементов при вычислении параметров механики разрушения в задачах динамики. Проведен анализ влияния аппроксимации трещины специальными конечными элементами на точность вычисления параметров механики разрушения. Рассмотрен прямой метод вычисления динамического КИН в сравнении с энергетическим подходом на основе J – интеграла. Исследована достоверность применения метода реакций в задачах динамики для различных схем интегрирования уравнений движения во времени. Решены тестовые задачи вычисления динамического КИН для задач смешанного разрушения. Демонстрация возможностей подхода проведена на примере исследования динамического деформирования емкости высокого давления с кольцевой трещиной и димфирующего устройства с продольной трещиной.

Ключевые слова: динамика, трещина, динамический коэффициент интенсивности напряжений, J -интеграл, призматические тела, тела вращения, полуаналитический метод конечных элементов.

ANNOTATION

Vabishchevich M.O. Numerical simulation of non-stationary elastic oscillation of 3D bodies with cracks based on semi-analytical finite element method. – Manuscript.

Dissertation on the receipt of scientific degree of candidate of engineering sciences, specialty 05.23.17 – structural mechanics. – Kyiv national university of construction and architecture of Ministry of education and science, youth and sport of Ukraine, Kyiv, 2012.

The effective methodology to simulate crack behaviour and algorithm to determine fracture mechanics parameters for bodies of revolution and prismatic bodies under non-stationary forces are developed using semianalytical finite element method. Theory and features of fracture parameters calculation based on energy approach using a special circular and prismatic finite elements with crack is presented. The analysis of the effectiveness of the proposed algorithms are performed.

The results of researches of reliability and efficiency of the semianalytical finite element method for calculating the fracture mechanics parameters in the dynamic problems are presented. Analysis of the crack approximation methodology based on special finite elements with crack to calculate fracture mechanics parameters is performed. Direct method of DSIF determination is shown in comparison with energy approach based on J-integral. The reliability of Reaction method for different schemes of time integration of motion equation are researched. Determination of mixed-mode fracture parameters in the range of dynamic problem is considered.

Keywords: dynamics, crack, dynamic stress intensity factor, J-integral, prismatic body, body of revolution, semianalytical finite element method.

Підписано до друку 23.04.2013 р. Формат 60x90/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Тираж 100. Зам. 22.

«Видавництво “Науковий світ”»[®]
Свідоцтво ДК № 249 від 16.11.2000 р.
м. Київ, вул. Боженка, 23, оф. 414.
200-87-13, 200-87-15, 050-525-88-77
E-mail: nsvit@mail.ru

