

ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертаційну роботу кандидата технічних наук
Вабіщевича Максима Олеговича

“Чисельне моделювання процесів нелінійного деформування
неоднорідних просторових тіл з урахуванням появи та
розповсюдження тріщини в умовах динамічного навантаження”,
прийнятої до захисту в спеціалізовану вчену раду Д 26.056.04 на
здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за
спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Прагнення до збільшення терміну експлуатації відповідальних об'єктів сучасної техніки обумовлює використання конструктивних елементів і деталей при наявності в них дефектів у вигляді тріщин. У багатьох випадках елементи несучих конструкцій знаходяться під дією довільно розподілених в просторі і часі нестационарних динамічних навантажень різної тривалості. Визначення тріщиностійкості зазначених об'єктів є вирішальним фактором запобігання можливих аварійних ситуацій. У зв'язку з цим, виникає необхідність більш глибокого теоретичного аналізу особливостей поведінки таких конструкцій і створення відповідних чисельних засобів для визначення динамічних параметрів механіки руйнування.

Сучасний розвиток комп'ютерної техніки та чисельного моделювання дозволив значно розширити коло задач будівельної механіки, доступних для розв'язання у повсякденній інженерній практиці. Науковці, в свою чергу, отримали можливості проведення досить складних досліджень та швидкої реалізації своїх ідей, які закладаються до нових теорій та підходів, ускладнення постановок задач для реалізації більш адекватних розрахункових схем. Звичайно, експеримент залишається базовим інструментом для отримання найбільш достовірних даних, але чисельні методи дають змогу в короткий термін та з меншими витратами, а інколи залишаються єдиним варіантом оцінки реального стану речей та прогнозування подальшого розвитку подій.

Багато вузлів і деталей, які зараз використовуються в машинобудуванні, енергетиці та інших галузях техніки представляють собою просторові тіла обертання або призматичні тіла складної форми і структури поперечного перерізу. До них відносяться елементи систем кріплення, демпферних пристроїв, судини тиску, зразки для визначення динамічних параметрів механіки руйнування і т.і. Одним з найбільш універсальних і ефективних чисельних методів дослідження зазначеного класу об'єктів є напіваналітичний метод скінченних елементів (НМСЕ), який представляє об'єктноорієнтовану модифікацією класичного метода скінченних елементів і входить до низки так

званих дискретно континуальних методів розрахунку.

Розвиток теорії та практичне застосування НМСЕ до широкого кола задач механіки здійснене в роботах П.О.Акімова, В.А.Баженова, О.І.Гуляра, О.Зенкевича, О.Б.Золотова, Б.Я.Кантора, А.І.Лантух-Лященко, О.С.Сахарова, М.М.Шапошнікова, Ю.М.Шевченка та інших. В той же час в межах НМСЕ недостатньо висвітлені питання створення ефективних скінченноелементних баз для побудови дискретних динамічних моделей просторових тіл із довільними граничними умовами, розробки алгоритмів обчислення параметрів механіки руйнування в умовах динамічного навантаження з урахуванням пластичних деформацій та розвитку тріщини.

Зважаючи на викладене, тема дисертаційної роботи Вабіщевича М.О. є актуальною. Це підтверджується також і узгодженням теми дисертації із низкою держбюджетних науково-дослідних робіт, виконання яких здійснювалось за активною участю Вабіщевича М.О. Результати виконання цих робіт склали основну частину розглядуваної дисертаційної роботи.

Дисертація складається зі вступу, де надана загальна характеристика роботи, шести розділів, списку посилань, висновків і додатку, в якому містяться дані про впровадження результатів роботи.

В першому розділі подано огляд підходів до опису процесів пружнопластичного деформування і дискретного руйнування просторових тіл, що дозволило окреслити коло невирішених проблем і обґрунтувати задачі дослідження.

Другий розділ присвячено постановці проблеми, вибору систем координат, рівнянь теорії пружності та пластичності. Наведені вихідні співвідношення механіки руйнування та фізично і конструктивно нелінійного деформування просторових тіл, що знаходяться в умовах динамічного навантаження. Запропонована концепція розгляду задач контактної взаємодії системи тіл та тіл з тріщинами. Для опису напружено-деформованого стану (НДС) в околі фронту тріщини і визначення тріщиностійкості, в залежності від типу деформування та характеру діючого навантаження використовуються такі параметри механіки руйнування, як параметр Гріффітса G , коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН) та J -інтеграл Черепанова-Райса. Класичні співвідношення представлені в криволінійній системі координат.

В третьому та четвертому розділах проведено розвиток НМСЕ для визначення динамічного НДС просторових тіл з різними типами граничних умов. Отримані вирази матриці жорсткості, вектора вузлових реакцій та мас для кругового і призматичного скінченного елемента (СЕ) із чисельним інтегруванням. Використання базового скінченного елемента, як основи для побудови спеціальних контактних та скінченного елемента з тріщиною, дозволило автору значно спростити алгоритми розрахунку, природно, за необхідності переходячи від одного типу елемента до іншого.

П'ятий розділ відображає результати розв'язання задач механіки руйнування для тіл із стаціонарними тріщинами в умовах динамічного

пружнопластичного деформування. Наведено ефективні методики апроксимації зон тріщиноутворення та алгоритми обчислення динамічних параметрів механіки руйнування. Проведені дослідження щодо обґрунтування їх достовірності та ефективності. На основі запропонованого спеціального скінченного елемента з тріщиною отримані результати розв'язання прикладних задач теорії тріщин.

Шостий розділ присвячено аналізу особливостей чисельного дослідження розвитку тріщин на базі розроблених проблемноорієнтованих скінченних елементів. Дослідження траєкторії розвитку поздовжньої початкової тріщини виконуються на основі методики розробленої в роботах В.А.Баженова, О.І.Гуляра, Ю.В.Максим'юка відповідно до критерію локального руйнування, запропонованого Ф.Ердоганом і Г.Сі. При цьому, розвиток тріщини при несиметричному навантаженні відбувається в напрямку, перпендикулярному дії максимальних розтягувальних напружень. Результати розв'язання тестових задач свідчать про ефективність та достовірність розробленої методики. Орієнтація методики на динамічні процеси, окрім традиційних параметрів механіки руйнування обумовила розгляд таких параметрів, як швидкість росту/затухання тріщини, оцінку часових інтервалів зазначених процесів. Представлені експериментальні і чисельні дослідження важливих прикладних задач механіки руйнування і теорії тріщин.

Обґрунтованість наукових положень дисертації і достовірність результатів. Вибір автором фізичних співвідношень для опису процесу пружнопластичного деформування та параметрів механіки руйнування є достатньо обґрунтованим. Теоретичні положення, висновки і рекомендації, наведені в дисертаційній роботі, ґрунтуються на використанні сучасних підходів і апробованих методів наукових досліджень. Достовірність отриманих результатів забезпечується проведеними дослідженнями їх збіжності при згущенні скінченоеlementної сітки, кількості часових кроків, та узгодженням отриманих результатів із даними наведеними в роботах інших авторів.

Наукова новизна роботи полягає у створенні на основі напіваналітичного методу скінченних елементів ефективною методики визначення параметрів механіки руйнування в рамках перехідних динамічних процесів, що протікають в просторових призматичних тілах і тілах обертання зі стаціонарними та рухомими тріщинами; в розв'язанні актуальних задач математичного моделювання динамічних процесів фізично нелінійного деформування, контактної взаємодії та руйнування тонкостінних, масивних, комбінованих тіл для оцінки тріщиностійкості і несучої здатності об'єктів сучасної техніки.

Практичне значення роботи і рекомендації до використання результатів. В ході виконання роботи створені методики і програмні засоби для визначення тріщиностійкості просторових тіл з тріщинами, які використані при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт та в учбовому процесі при побудові навчальних програм для випускників будівельного факультету КНУБА. Подальше впровадження результатів дисертаційної роботи може бути

здійснено в науково-дослідних і виробничих закладах для розв'язання практичних задач, пов'язаних із визначенням параметрів механіки руйнування просторових об'єктів з тріщинами, що підкріплено вже наявними підтвердженнями впроваджень різних будівельних організацій.

Оцінка змісту роботи, публікацій і автореферату. Дисертація Вабіщевича М.О. являє собою завершене наукове дослідження, яке виконане на сучасному рівні. Викладення матеріалу є послідовним, логічним, аргументованим і відповідає фаховій термінології. Загальні висновки по дисертації достатньо чіткі, лаконічні і в цілому (повністю) відображають викладені в роботі результати досліджень. Зміст дисертації повністю відображений у 26 публікаціях. За результатами дисертації опубліковано дві монографії, результати доповідались на наукових і міжнародних конференціях.

Текст автореферату відповідає змісту дисертації і повністю його відображає.

Викладену в дисертаційній роботі розрахункову методику вирішення просторових динамічних задач теорії тріщин по суті можна розглядати як розвиток напіваналітичного методу скінченних елементів стосовно аналізу динамічних задач механіки руйнування для просторових пружних та пружно-пластичних тіл обертання і призматичних тіл довільного перетину, що знаходяться під дією нестационарних навантажень різної інтенсивності і тривалості у часу.

Актуальність тематики зумовлена прагненням до збільшення терміну експлуатації відповідальних об'єктів сучасної техніки, що призводить до необхідності обґрунтування міцності і опору руйнуванню конструктивних елементів і деталей при наявності в них тріщиноподібних дефектів.

Вважаю, що практичні результати дисертаційної роботи можна значно посилити аналізом міцності і цілісності корпусу реактора атомних станцій при обґрунтуванні продовження ресурсу безпечної експлуатації енергоблоку АЕС у понадпроектний період. Основним критерієм при цьому є здатність корпусу реактора чинити опір крихко-в'язкому руйнуванню за режимів з термошоком. Саме застосування методів механіки руйнування з використанням положень нормативних документів регулюючих органів в атомній галузі України дозволяє отримати адекватну прогностичну оцінку тріщиностійкості корпусу реактора при моделюванні нестационарних аварійних режимів охолодження реактора.

По дисертаційній роботі є наступні зауваження:

1. В огляді літератури не достатньо представлені результати зарубіжних публікацій, присвячених розробці та застосуванню методу вузлових реакцій і переміщень для обчислення J -інтеграла в дво- і тривимірних задачах механіки руйнування. Насамперед потрібно було б згадати публікацію E.F.Rybicki та M.F.Kanninen «*A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral*» в міжнародному журналі *Engineering Fracture Mechanics* в 1977 р., які перші запропонували використання методу вузлових реакцій для

визначення J -інтеграла в двовимірних задачах. Автори публікації використовують в назві і в статті термін інтеграл закриття тріщини, замість J -інтегралу, що свідчить про те, що інваріантність модифікованого інтегралу не враховувалася. Пізніше в 1985 р. співробітники наукового центру в Ленглі розвинули даний метод стосовно до тривимірного випадку. В теперішній час метод вузлових реакцій і переміщень впроваджений в комерційний програмний продукт ANSYS для розв'язання задач лінійної механіки руйнування, що відображено в керівництві для користувача під назвою Virtual Crack Closure Technique (VCCT). Серед вітчизняних вчених, як згадано в дисертації, над проблемою працювали, проф. О.С.Сахаров і проф. А.І. Гуляр, які дали теоретичне обґрунтування коректності методу реакцій і доведення інваріантності J -інтеграла, який представлено у вигляді вузлових реакцій і переміщень. Узагальнення і застосування методу реакцій до розв'язання нелінійних задач теорії тріщин міститься в публікаціях проф. В.А.Баженова і його учнів.

2. Слід привести більш детальне обґрунтування, пов'язане з адекватною оцінкою коректності застосування двовимірного J -інтеграла до визначення параметрів тріщиностійкості для просторових тіл обертання, а також прямолінійних і криволінійних призматичних тіл з тріщинами. Які фактори спонукали автора роботи використовувати двовимірний J -інтеграл Черепанова-Райса, коректне застосування якого обмежено умовами плоского напруженого і (або) плоского деформованого стану. Чому для визначення енергетичного J -інтеграла в розробленій методиці не використовується метод енергетичного об'ємного інтегрування (ЕОІ), застосування якого цілком обґрунтовано для пружних і пружно-пластичних тіл з тріщиною довільної просторової форми за умов монотонного навантаження.

3. Недостатньо обґрунтований вибір і адекватність використовуваних локальних параметрів руйнування матеріалу в околі фронту тріщини при динамічному навантаженні конструкції з урахуванням пружно-пластичних деформацій при складному непропорційному навантаженні. Яким чином враховується в розрахунку дисипація енергії при просуванні тріщини в пружно-пластичному тілі. Чи має місце інваріантність J -інтеграла в пружно-пластичному тілі при моделюванні зростання тріщини. Не представлені результати теоретичного та розрахункового аналізу ефекту розвантаження матеріалу при моделюванні процесу розповсюдження тріщини з урахуванням пружно-пластичних деформацій.

4. Розв'язування нелінійних задач механіки руйнування проводиться за кроковим алгоритмом. При цьому в роботі не наведено даних про теоретичне обґрунтування величини кроку за навантаженням або його обмеження.

5. В роботі недостатньо описана процедура визначення швидкості руху тріщини та питання збіжності результатів розрахунку за кроком в часі.

6. Автором в дисертації розв'язано декілька складних просторових задач, які є актуальними в прикладних аспектах. В той же час використання цих

результатів ускладнено, тому що в більшості випадків не конкретизовані типи матеріалів цих елементів конструкцій, а вказаний тільки модуль пружності та коефіцієнт Пуассона.

7. В дисертації та авторефераті, на жаль, відсутня інформація про розроблене автором програмне забезпечення (в якому програмному середовищі реалізовані програми, наявність функцій для автоматичної побудови дискретних моделей і т.і.).

Зроблені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку одержаних у дисертації результатів і не знижують їх наукову цінність. Вважаю, що дисертаційна робота Вабіщевич М.О. “Чисельне моделювання процесів нелінійного деформування неоднорідних просторових тіл з урахуванням появи та розповсюдження тріщини в умовах динамічного навантаження” відповідає вимогам МОН України щодо порядку присудження наукових ступенів, а її автор Вабіщевич Максим Олегович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Офіційний опонент -
провідний науковий співробітник
відділу чисельних і експериментальних
методів дослідження конструкційної міцності
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник

О.Ю. Чирков

Підпис О.Ю. Чиркова засвідчую:

Учений секретар
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України
кандидат технічних наук



В.І. Скрипченко