

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**

на дисертаційну роботу кандидата технічних наук  
Шкриля Олексія Олександровича

“Чисельний аналіз тріщиностійкості просторових призматичних і кругових тіл складної форми при дії поверхневих та об’ємних сил різної природи”, 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.

Визначення напружено-деформованого стану НДС просторових тіл з тріщинами на сьогоднішній день виконується із застосуванням чисельних методів, серед яких найбільшого поширення здобув метод скінченних елементів (МСЕ). Питання розв’язання просторових задач механіки руйнування на основі МСЕ при наявності об’ємних сил, що можуть бути викликані дією різних факторів, не знайшло достатнього відображення в наукових дослідженнях. Тому вирішення зазначеної проблеми є актуальною задачею будівельної механіки. Об’єкти, що розглядаються в даній дисертації можна віднести до просторових неоднорідних кругових та призматичних тіл складної форми з довільними граничними умовами. Чисельний розрахунок таких тіл доцільно виконувати на основі напіваналітичного методу скінчених елементів (НМСЕ). Застосування НМСЕ для розв’язання задач лінійної механіки руйнування та при пружнопластичному деформуванні тіл з тріщинами виявило його ефективність в умовах дії поверхневих сил. В той же час в межах НМСЕ недостатньо висвітлені питання створення ефективних скінченно-елементних (СЕ) баз для побудови не ортогональних дискретних моделей кругових і призматичних тіл з довільними граничними умовами в неоднорідному температурному полі, не створено алгоритмів розв’язання задачі нестационарної теплопровідності та методики визначення параметрів механіки руйнування при дії об’ємних сил.

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

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

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



дослідження.

У другому розділі наведені вихідні співвідношення механіки руйнування та термопружного деформування просторових тіл. Для опису 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. Співвідношення термопружності представлені в криволінійній системі координат.

В третьому та четвертому розділах проведено розвиток НМСЕ для визначення пружного стану просторових тіл складної форми. Отримані вирази матриці жорсткості та вектора вузлових реакцій для кругового і призматичного скінченного елемента (СЕ) із чисельним інтегруванням, використання яких дозволяє ефективно моделювати НДС порівняно із тривимірним МСЕ. Для моделювання тріщини в просторових тілах розроблено спеціальний скінченний елемент з тріщиною.

В п'ятому розділі побудовані розв'язувальні співвідношення НМСЕ для просторової задачі нестационарної теплопровідності та термопружного деформування. Для чисельного розв'язання задач теплопровідності розроблений неоднорідний скінченний елемент, конфігурація в якому розподілення температури у межах поперечного перетину СЕ описується білінійним законом. В напрямку утворюючої температура та її похідні апроксимуються за поліномами Лагранжа та Міхліна. Визначення температурних деформацій та напружень виконується у відповідності з моментною схемою скінченних елементів в термінах фізичних величин. При покроковому поданні процесу деформування коефіцієнти розкладання приростів напружень на кроці визначаються за величинами приростів повних і температурних деформацій. Результати розв'язання тестових задач показують ефективність розроблених методик порівняно із тривимірним МСЕ.

В шостому розділі розроблені методи визначення параметрів механіки руйнування в дискретних моделях НМСЕ. Вперше розроблена методика визначення параметра Гріффітса  $G$  на основі величин вузлових реакцій та переміщень дискретної моделі. Показано можливість обчислення  $G$  не по всій дискретній моделі, а лише по привершинному об'єму довільної розмірності. Це значно спрощує процедуру його визначення, та зменшує обчислювальні витрати. Результати розв'язання тестових задач показали ефективність розробленого методу як при дії поверхневих так і об'ємних сил. При наявності об'ємних сил, що викликані дією температурних впливів в якості параметра механіки руйнування можна використовувати  $J^*$ . В дисертації розроблена методика визначення  $J^*$  на основі методу реакцій. На відміну від методики визначення  $G$ , обчислення  $J^*$  потребує разового розв'язання задачі МСЕ. Для умов лінійного руйнування, реалізована методика визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН).



В цьому розділі наведені результати апробації розроблених методів визначення параметрів механіки руйнування на тестових задачах. Були розглянуті різні типи задач механіки руйнування: з тріщинами нормального відриву, змішаного руйнування, та за умов дії температурного навантаження. Результати визначення параметрів механіки руйнування за трьома запропонованими методами добре узгоджуються між собою і результатами наведеними іншими авторами.

В восьмому розділі розглянуто задачі механіки руйнування за умов пружнопластичного деформування. Моделювання процесів пружнопластичного деформування здійснюється шляхом їх подання у вигляді сукупності дискретних кроків за параметрами зовнішнього навантаження. На кожному кроці для розв'язання систем нелінійних рівнянь НМСЕ використовується метод Ньютона-Канторовича. Обчислення напружень при наявності деформацій пластичності здійснюється на основі методики Уїлкінса. В якості параметра механіки руйнування використовувався  $J$ -інтеграл Черепанова-Райса. На прикладі двох тестових задач показана ефективність розроблених методів при розв'язанні нелінійних задач механіки руйнування.

В дев'ятому розділі на основі використання розроблених підходів наведені розв'язки прикладних задач. На прикладі визначення тріщиностійкості захисної оболонки ядерного реактора, показана можливість застосування розроблених підходів для розрахунку об'єктів, що знаходяться під впливом об'ємних сил, викликаних дією термосилового навантаження. При визначенні тріщиностійкості ротора парової турбіни, об'ємні сили були викликані дією відцентрових сил. Результати розрахунку резервуара показали ефективність розроблених методів при визначенні тріщиностійкості в тонкостінних об'єктах. Розрахунок компактного зразка за умов пружнопластичного деформування демонструє можливість розроблених підходів при розв'язанні нелінійних задач механіки руйнування.

Обґрунтованість наукових положень дисертації і достовірність результатів. Вибір автором фізичних співвідношень для опису процесу термопружного і пружнопластичного деформування та параметрів механіки руйнування є обґрунтованим. Достовірність результатів забезпечується проведеними дослідженнями їх збіжності при згущенні скінчено елементної сітки та кількості кроків за параметром навантаження, та узгодженням отриманих результатів із даними наведеними в роботах інших авторів.

Наукова новизна роботи полягає в отриманні розв'язувальних співвідношень НМСЕ просторової нестационарної задачі теплопровідності для кругових і призматичних тіл. Побудовані вирази матриці жорсткості і вектора вузлових реакцій для нових типів скінчених елементів. На основі величин вузлових реакцій та переміщень розроблена методика визначення параметра Гріффітса шляхом обчислення об'ємних інваріантних інтегралів. На основі методу реакцій розроблена методика визначення  $J^*$  методом зміщення підобласті. Проведено розв'язання



складних просторових задач, які є актуальними при визначенні несучої здатності відповідальних елементів конструкцій, що використовуються в різних галузях промисловості.

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 виконанні магістерських робіт. 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.

Оцінка змісту роботи, публікацій і автореферату. Дисертація Шкриля О.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 цілком відбивають викладені в роботі результати досліджень. Зміст дисертації повно відображений у 28 публікаціях. За результатами дисертації опублікована монографія, результати доповідались на наукових і міжнародних конференціях.

Текст автореферату відповідає змісту дисертації і повно його відображає.

Результати наукових досліджень, за якими автор захистив кандидатську дисертацію, не виносяться на захист докторської дисертації.

По дисертаційній роботі є наступні зауваження:

1. 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.
2. В роботі розглянуто об'єкти з тріщинами. Наявність концентраторів мала б призвести до виникнення деформацій пластичності. Виходячи з цього бажано було б в дисертації пояснити, чому в деяких об'єктах вплив пластичних деформацій не розглядається.
3. При термосиловому навантаженні обов'язковою та достатньою умовою активного навантаження, коли виникають прирости незворотніх деформацій ( $d\varepsilon_i^{-(p)} > 0$ ) в зоні концентрації напружень (деформацій), наступні:  $\sigma_i = \sigma_T(T)$  та  $d\sigma_i > \frac{\partial \sigma_T(T)}{\partial T} dT$ . На жаль, в роботі автором не розглядається остання умова.
4. В списку літератури автором недостатньо повно відображено результати досліджень в області термопружності та термов'язкопластичності, які отримані для потреб суднобудування та авіаційної промисловості, зокрема: проф. Біргером І.А., проф. Дем'янушко І.В., проф. Карзовим Г.П. та інш.

5. Для обґрунтування достовірності, ефективності та меж використання чисельного підходу на основі НМСЕ автор в більшості випадків використовує в якості еталонного розв'язок на базі МСЕ. В той же час для більшості тестових прикладів можливо було використати аналітичний розв'язок в якості базового (див. дисертацію: стор. 84, 86, 121, 138, 146, 171, та інш.).
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 вказані 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.).

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи :

Таким чином, дисертаційна робота "Чисельний аналіз тріщиностійкості просторових призматичних і кругових тіл складної форми при дії поверхневих та об'ємних сил різної природи " відповідає вимогам МОН України щодо порядку присудження наукових ступенів, а її автор Шкриль Олександр Олександрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 – будівельна механіка.

Офіційний опонент

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор  
директор Механіко-машинобудівного інституту  
Національного технічного університету України  
"Київський політехнічний інститут" ім. Ігоря Сікорського,



*Handwritten signature and date:*  
18.05.18p

М.І.Бобир