

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КОЗУБ ВЛАДИСЛАВ ЮРІЙОВИЧ

УДК: 004.896.032.26:539.3(043.5)

АНОТАЦІЯ

СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАЛЕЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Спеціальність: 122 Комп'ютерні науки

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В. Ю. Козуб

Науковий керівник: Гоменюк Сергій Іванович, доктор технічних наук,
професор

Запоріжжя 2023

АНОТАЦІЯ

Козуб В. Ю. Скінченно-елементний аналіз з використанням паралельних технологій. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки. – Запорізький національний університет Міністерства освіти і науки України, Запоріжжя, 2023.

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет дослідження, розкрито наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів. Наведено дані щодо апробації результатів дослідження та їх висвітлення у наукових публікаціях.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан досліджень за тематикою роботи. Зроблено огляд публікацій, проаналізовано методи паралельного програмування при моделюванні та прогнозування у задачах механіки твердого тіла. При застосуванні методу скінченних елементів процес розв'язування задачі складається з наступних етапів: формування вихідних даних; формування і розв'язування системи рівнянь; процедура виведення результатів. Для підвищення продуктивності паралелізації методу скінченних елементів використовуються різні підходи: використання модифікованих алгоритмів систем рівнянь, застосування декомпозиції розрахункової області. В кожному випадку виникає необхідність забезпечення додаткових граничних умов збіжності методу. У більшості існуючих пакетів прикладних програм методу скінченних елементів розрахунок проводиться за традиційною послідовною схемою. Паралелізація обчислювальних процесів для вже існуючої архітектури програмного забезпечення потребує розробки алгоритмів використання паралельних обчислень на етапі формування систем розв'язувальних

рівнянь.

У другому розділі розглянуто особливості побудови розв'язувальних рівнянь, що описують процеси деформування під дією силових та теплових навантажень. На основі співвідношень тривимірної теорії пружності та термопружності ізотропних та анізотропних тіл побудовано матриці жорсткості та теплопровідності скінченного елемента. Розроблена методика є універсальною і має ряд особливостей, а саме: незалежність порядку розв'язувальних рівнянь від структури шаруватих тіл; можливість завдання значень відповідних теплофізичних характеристик ізотропних або анізотропних шарів шаруватих тіл; можливість використання тривимірних скінчених елементів при моделюванні фізико-механічних процесів, що відбуваються в конструкціях довільної геометричної форми за реальних умов експлуатації. Застосування запропонованої методики дозволяє вирішувати задачі термомеханіки конструкцій у тривимірній постановці.

У третьому розділі розроблено підхід до використання паралельних обчислень в методі скінчених елементів в рамках підсистем пакету прикладних програм "МІРЕЛА+". Запропоновано методику паралелізації обчислення компонентів матриць систем розв'язувальних рівнянь скінченного елемента. Розроблено і реалізовано алгоритм паралельного обчислення матриці жорсткості скінченного елемента для задач пружного деформування конструкцій, а також процедуру обчислення параметрів напруженого стану за результатами скінченно-елементного розв'язку. Розроблено алгоритми розв'язку нелінійних задач механіки та задачі термопружності з використанням паралельних обчислень.

У четвертому розділі наведено розв'язки практичних задач пружності та термопружності. Розглянуто рішення для шаруватих конструкцій з анізотропними шарами. Для розв'язку зв'язаної задачі термопружності шаруватої анізотропної конструкції отримані співвідношення для визначення теплофізичних параметрів шарів. Обчислено напружено-

деформований стан конструкцій за традиційною схемою та з використанням паралельних обчислень. Досліджено вплив використання паралельних технологій на продуктивність скінченно-елементного розв'язування задач механіки.

У висновках наведено наукову новизну роботи, її практичну значущість і перспективи подальшого розвитку.

У дисертаційній роботі отримано такі наукові результати: вперше розроблено алгоритми паралельних обчислень матриць жорсткості скінченних елементів на основі моментної схеми скінченних елементів для задач пружності; вперше розроблено паралельні алгоритми обчислення матриць теплопровідності для розв'язання задач теплопровідності; отримали подальший розвиток алгоритми паралельних обчислень у застосуванні до розв'язування лінійних та нелінійних задач; вперше розроблено застосунок з використанням алгоритмів паралельних обчислень в рамках пакету прикладних програм "МІРЕЛА+" для розв'язання задач термопружності конструкцій.

Програмну реалізацію наведеної методики розв'язування задач написано мовою програмування Fortran 2018 на основі Intel Fortran Compiler з використанням бібліотеки паралельного програмування в системах зі спільною пам'яттю OpenMP.

Ключові слова: метод скінченних елементів, моментна схема скінченних елементів, паралельні обчислення, напружено-деформований стан, термопружність, шаруваті конструкції.

ABSTRACT

Kozub, V. Yu. Finite element analysis using parallel technologies. Qualifying scientific work on the rights of a manuscript.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree. Speciality: 122 – Computer Science. Zaporizhzhia National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Zaporizhzhia, 2023.

The introduction justifies the choice of the dissertation topic, formulates the purpose, tasks, object, subject of the research, reveals the scientific novelty, and practical significance of the obtained results. Data on the validation of research results and their presentation in scientific publications are provided.

In the first chapter, the current state of research in the field is analyzed. A review of publications is conducted, and parallel programming methods in modeling and forecasting in solid mechanics problems are considered. The finite element method involves the following stages: input data preparation; system of equations formation and solution; output of results. Various approaches are used to enhance the parallelization performance of the finite element method: modified algorithms for equation systems and computational domain decomposition. Each case requires additional convergence boundary conditions for the method. Most existing finite element method software packages follow a traditional sequential calculation scheme. Parallelizing computational processes for existing application architecture requires the development of algorithms for parallel computations during the formation of solution system equations.

In the second chapter, the construction of solution equations describing deformation processes under the influence of force and thermal loads is considered. Stiffness and thermal conductivity matrices of a finite element are constructed based on the three-dimensional theory of elasticity and thermoelasticity for isotropic and anisotropic materials. The developed method is universal and has unique features, such as independence of the order of solution

equations on the structure of layered bodies, the ability to specify values of corresponding thermophysical characteristics for isotropic or anisotropic layers, and the use of three-dimensional finite elements in modeling physical-mechanical processes in structures of any geometric shape under real operating conditions. The proposed method allows solving thermo-mechanical problems of constructions in three dimensions.

In the third chapter, an approach to using parallel computations in the finite element method within the subsystems of the "MIRELA+" software package is developed. A method for parallelizing the calculation of components of stiffness matrices for a finite element is proposed and implemented. An algorithm for parallel computation of the stiffness matrix for problems of elastic deformation of structures and a procedure for computing stress state parameters based on finite element solutions are developed. Algorithms for solving nonlinear mechanics problems and thermomechanical problems using parallel computations are also developed.

In the fourth chapter, solutions to practical elasticity and thermoelasticity problems are presented. Solutions are considered for layered structures with anisotropic layers. For solving the coupled thermoelasticity problem of a layered anisotropic structure, relationships for determining the thermophysical parameters of layers are derived. The stress-strain state of structures is calculated using both traditional and parallel computing schemes. The influence of parallel technologies on the productivity of finite element solution of mechanics problems is investigated.

The conclusions highlight the scientific novelty, practical significance, and prospects for further development of the work.

Scientific results obtained in the dissertation: algorithms for parallel computations of stiffness matrices of finite elements based on the moment scheme of finite elements for elasticity problems are developed; parallel algorithms for computing thermal conductivity matrices for heat conduction problems are

developed for the first time; parallel computation algorithms for linear and nonlinear problems gained further development; application using parallel computation algorithms within the "MIRELA+" software package for solving thermoelasticity problems of constructions is developed for the first time.

The software implementation of the proposed problem-solving method is written in Fortran 2018 using the Intel Fortran Compiler and OpenMP parallel programming library for shared memory systems.

Keywords: finite element method, moment scheme of finite elements, parallel computing, stress-strain state, thermoelasticity, layered structures