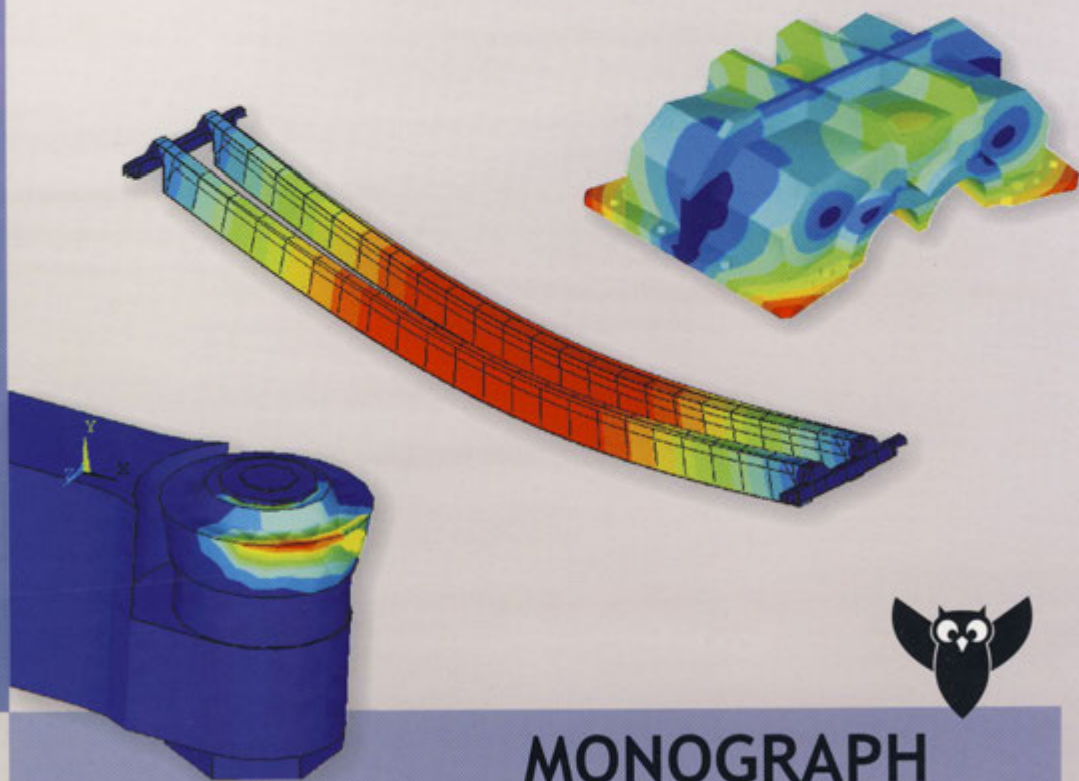


Edited by  
**Aleksander SŁADKOWSKI**

# **FINITE ELEMENT METHOD FOR TRANSPORT APPLICATIONS**



**MONOGRAPH**



GLIWICE 2011

**Edited by**  
**Aleksander SŁADKOWSKI**

**FINITE ELEMENT METHOD FOR  
TRANSPORT APPLICATIONS**

SILESIAAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
GLIWICE 2011

*Reviewers*

Dr hab. inż. Paweł PIEC, prof. Politechniki Krakowskiej

Prof. dr hab. inż. Vladimir I. SAKALO

*Editorial Council*

Editor-in-chief - Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ

Department Editor - Dr inż. Piotr CZECH

Editor Secretary - Mgr. Elżbieta LEŚKO

*Cover project*

Tomasz LAMORSKI

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

ISBN 978-83-7335-876-8

@ Copyright by  
Wydawnictwo Politechniki Śląskiej  
Gliwice 2011

## CONTENTS

*A. Śladkowski*

<b>Introduction</b> .....	13
---------------------------	----

### Chapter 1

*P. Folega, T. Figlus, A. Wilk, B. Łazarz, H. Madej, G. Peruń*

<b>Use of FEM in designing housings of transport equipment</b> .....	23
1. Design method of housings with lowered vibroactivity .....	23
2. FEM models of housing .....	25
3. Modal analysis of housing .....	28
4. Experimental verification of FEM models .....	30
5. Housing FEM modeling .....	31
5.1. Simplified numerical models .....	31
5.2. Computational models .....	34
6. Conclusions .....	38
7. Acknowledgments .....	39
References .....	39

### Chapter 2

*P. Folega*

<b>Modeling of harmonic drive flexspline</b> .....	41
1. The components and principle of operation of harmonic drive .....	41
2. FEM models of harmonic drives .....	41
3. Vibration shapes and natural frequencies of flexsplines .....	46
4. New materials for flexsplines .....	48
5. Conclusions .....	51
References .....	56

### Chapter 3

*A. Al-Ali, Y. Abdel-Nasser, A. Aliraqi*

<b>Collision analysis of stiffened plates</b> .....	57
1. Collision models in modern publications .....	57
2. FEA software selection .....	58
3. Simulation of impact on ship structural components .....	58
3.1. Collision analyses of transversely stiffened plates .....	60
3.2. Collision analysis of longitudinally stiffened plates .....	62
4. Conclusions .....	64
5. Acknowledgments .....	64
References .....	64

## Chapter 4

*A. Śladkowski, D. Gąska, T. Haniszewski*

<b>Finite element method usage in designing transport machinery and material handling equipment</b> .....	67
1. Using of the FEM for analysis of industrial transport problems.....	67
2. Design methodology for 3D model using Autodesk Inventor .....	67
2.1. Fundamentals of project management.....	68
2.2. The process of 3D model building.....	68
2.3. 2D sketches, 2D operations.....	69
2.4. Assembly creating, 3D operations .....	69
2.5. 2D documentation.....	70
2.6. Realistic model presentation .....	72
2.7. The methodology of the FEM model creation, the definition of the problem on the example of the crane bridge .....	73
2.7.1. FEM model, pre-processor.....	73
2.7.2. Boundary conditions .....	75
2.7.3. Loads application and setting of material .....	77
2.7.4. Calculations – processor .....	79
2.7.5. Analysis of results: stress distributions.....	79
2.7.6. Analysis of results: displacements and form of vibrations .....	81
3. FEM research of new load-carrying construction of belt conveyor.....	83
4. Calculation of elevators rack lock in overhead conveyor on the production line of car factory.....	88
5. Strength calculations for a special technological pallet.....	92
6. Strength calculations of bridge crane girders.....	94
7. Modeling influence of simplifications on stress and strain state in 450 t cranes hoisting winch construction .....	97
References.....	107

## Chapter 5

*H. Bąkowski, A. Posmyk*

<b>Finite elements method aided analysis of the wear of some selected sub-assemblies in technical means of transport</b> .....	109
1. Use of numerical methods for calculating of engines.....	109
2. The application of FEM for the explanation of wear mechanisms in vehicle subassemblies.....	110
2.1. Wear analysis of a piston group .....	110
2.2. Construction of 3D model.....	113
2.3. Construction of a discrete model.....	113
2.4. Description of material properties.....	116
2.5. Quality control of FEM mesh.....	116
2.6. Determination of boundary conditions.....	117
2.7. Determination of the analysis.....	118
2.8. Interpretation of the results .....	119
3. Simulation tests results of the crankshaft assembly.....	119
3.1. Stress distribution in standard operation conditions .....	119
3.2. Stress distribution in extreme operation conditions.....	122
3.3. Stress distribution in extreme operation conditions after water suction .....	123
4. Real tests results of the crankshaft assembly.....	123
5. The analysis of tribological wear mechanisms in piston ring / cylinder and piston coat / cylinder contacts.....	125

6. Conclusions.....	130
References.....	130
Chapter 6	
<i>M. Miros, T. Węgrzyn, D. Hadryś</i>	
<b>Comparative analysis of the stresses measurements in the truck frame.....</b>	<b>133</b>
1. Possible methods of stress analysis in the frames of trucks.....	133
2. The analytical methods of determination of the value of bending moments and stresses in stringers in the self-unloading truck frame .....	137
3. Analysis by finite elements method .....	138
4. Measurements of intensity of stresses by strain gauge methods.....	144
5. Conclusions.....	147
References.....	147
Chapter 7	
<i>S. Krotov, A. Śladkowski</i>	
<b>Strength and reliability of rolling stock wheel pair press assembly .....</b>	<b>149</b>
1. Improvement ways of railway wheels and axles assembly for increase of load bearing capacity.....	149
2. Assembly efficiency with guaranteed interference under static and dynamic loading.....	150
3. Review of theoretical solutions on strength and bearing ability of wheel-axle assembly .....	151
4. Application of FEM for deflected mode designing .....	153
4.1. The choice of calculation method and FEA software .....	155
4.2. Impact of loading conditions increase on wagon wheel-axle assembly bearing ability.....	161
5. Application of discriminant analysis while investigating bearing ability of press assembly of wagon wheelset.....	173
References.....	178
Chapter 8	
<i>A. Vorobyov</i>	
<b>Assessment of dynamic strength of cutting tools at high-hardness wheelset cutting.....</b>	<b>183</b>
1. Some problems of the Russian railways .....	183
2. Prospects for the application of the new types of wheels at the railway transport of the Russian federation.....	184
3. Technique and boundary conditions for calculation of dynamic strength of the cutting tool .....	194
4. Influence of the equipment stiffness .....	197
5. Substantiation of feed restriction according to the productivity criterion at the rough pass.....	197
6. Influence of wheel hardness on machining efficiency .....	199
7. Applications of prismatic cutting plate at clean cut.....	200
8. Cutting forces, power and the torques at machining of railway wheels .....	200
9. Calculation and analysis of the stress state of the cutting tool.....	202
10. Conclusions.....	206
References.....	207
<b>Abstract.....</b>	<b>209</b>

## SPIS TREŚCI

*A. Śladkowski*

<b>Przedmowa</b> .....	16
------------------------	----

Część 1

*P. Fołęga, T. Figlus, A. Wilk, B. Łazarz, H. Madej, G. Peruń*

<b>Wykorzystanie MES w projektowaniu korpusów maszyn transportowych</b> .....	23
1. Metoda projektowania korpusów o obniżonej wibroaktywności .....	23
2. Modele MES korpusów .....	25
3. Analiza modalna korpusów .....	28
4. Doświadczalna weryfikacja modeli MES .....	30
5. Modelowanie MES korpusów .....	31
5.1. Uproszczone modele numeryczne .....	31
5.2. Modele obliczeniowe .....	34
6. Wnioski .....	38
7. Podziękowania .....	39
Bibliografia .....	39

Część 2

*P. Fołęga*

<b>Modelowanie kół podatnych przekładni falowych</b> .....	41
1. Elementy i zasada działania przekładni falowej .....	41
2. Modele MES przekładni falowych .....	41
3. Postacie i częstotliwości drgań kół podatnych.....	46
4. Nowe materiały kół podatnych .....	48
5. Wnioski.....	51
Bibliografia .....	56

Część 3

*A. Al-Ali, Y. Abdel-Nasser, A. Aliraqi*

<b>Analiza zderzenia wzmocnionych płyt</b> .....	57
1. Modele zderzeń we współczesnych publikacjach .....	57
2. Dobór oprogramowania na podstawie MES .....	58
3. Modelowanie wpływu na elementy konstrukcji statku .....	58
3.1. Analiza zderzenia poprzecznie wzmocnionych płyt .....	60
3.2. Analiza zderzenia wzdłużnie wzmocnionych płyt .....	62
4. Wnioski.....	64
5. Podziękowania .....	64
Bibliografia .....	64

Część 4

*A. Śladkowski, D. Gąska, T. Haniszewski*

<b>Wykorzystanie metody elementów skończonych przy projektowaniu środków transportu i urządzeń transportu bliskiego</b> .....	67
---	----

1. Wykorzystanie MES do analizy problemów transportu przemysłowego .....	67
2. Metoda projektowania 3D modelu z wykorzystaniem Autodesk Inventor .....	67
2.1. Podstawy zarządzania projektami .....	68
2.2. Proces opracowania 3D modelu .....	68
2.3. 2D szkic, 2D operacji .....	69
2.4. Opracowanie zespołu, 3D operacji .....	69
2.5. 2D dokumentacja .....	70
2.6. Realistyczne przedstawienie modelu .....	72
2.7. Metoda opracowania modelu MES, sformułowanie problemu na przy- kładzie suwnicy .....	73
2.7.1. Model MES, preprocesor .....	73
2.7.2. Warunki brzegowe .....	75
2.7.3. Zadanie obciążeń i materiałów .....	77
2.7.4. Obliczenia - solver .....	79
2.7.5. Opracowanie wyników: rozkłady naprężeń .....	79
2.7.6. Opracowanie wyników: przemieszczenia i własne formy drgań .....	81
3. Analiza MES nowego układu nośnego przenośnika taśmowego .....	83
4. Obliczenie blokady windy transportera podwieszanego na linii produkcyjnej w fabryce samochodów .....	88
5. Analiza wytrzymałościowa specjalnej technologicznej palety .....	92
6. Analiza wytrzymałościowa belek suwnicy .....	94
7. Modelowanie wpływu uproszczeń na stan naprężeń i odkształceń ustroju nośne- go wciągarki 450 t suwnicy .....	97
Bibliografia .....	107

## Część 5

*H. Bąkowski, A. Posmyk*

<b>Analiza zużycia wybranych podzespołów technicznych środków transportu wspo- magana metodą elementów skończonych .....</b>	<b>109</b>
1. Metody numeryczne do obliczeń silników .....	109
2. Zastosowanie MES do wyjaśniania mechanizmów zużywania podzespołów po- jazdów .....	110
2.1. Analiza zużywania grupy tłokowej .....	110
2.2. Budowa 3D modelu .....	113
2.3. Budowa modelu dyskretnego .....	113
2.4. Określenie właściwości materiału .....	116
2.5. Kontrola jakości siatki MES .....	116
2.6. Określenie warunków brzegowych .....	117
2.7. Określenie rodzaju analizy .....	118
2.8. Interpretacja wyników .....	119
3. Wyniki badań symulacyjnych układu tłokowo-korbowego .....	119
3.1. Rozkład naprężeń w normalnych warunkach eksploatacji .....	119
3.2. Rozkład naprężeń w ekstremalnych warunkach eksploatacji .....	122
3.3. Rozkład naprężeń w ekstremalnych warunkach eksploatacji po zassaniu wody .....	123
4. Wyniki badań rzeczywistych układu tłokowo-korbowego .....	123
5. Analiza mechanizmów zużywania tribologicznego skojarzeń pierścieni tłokowy / tuleja cylindrowa i płaszcz tłoka / tuleja cylindrowa .....	125
6. Wnioski .....	130
Bibliografia .....	130



## Część 6

*M. Miros, T. Węgrzyn, D. Hadryś*

<b>Analiza porównawcza wartości naprężeń uzyskanych różnymi metodami w ramach pojazdów ciężarowych</b> .....	133
1. Metody pomiaru naprężeń w ramach pojazdów ciężarowych .....	133
2. Obliczeniowa metoda określania wartości momentów gnących oraz naprężeń w podłużnicach ramy samowyladowczej naczepy ciężarowej.....	137
3. Analiza z wykorzystaniem metody elementów skończonych.....	138
4. Pomiary naprężeń metodą tensometryczną.....	144
5. Wnioski.....	147
Bibliografia .....	147

## Część 7

*S. Krotov, A. Sładkowski*

<b>Wytrzymałość i niezawodność połączeń wciskowych kolejowych zestawów kołowych</b> .....	149
1. Udoskonalone metody montażu kół kolejowych i osi w celu zwiększenia nośności .....	149
2. Skuteczność połączenia z gwarantowanym wciskiem pod wpływem obciążenia statycznego i dynamicznego.....	150
3. Przegląd teoretycznych rozwiązań dla analizy wytrzymałościowej nośności połączenia koło - oś .....	151
4. Wykorzystanie MES do obliczeń wytrzymałościowych przy projektowaniu.....	153
4.1. Wybór metody obliczeń i oprogramowania MES.....	155
4.2. Wpływ warunków obciążenia na połączenie koło wagonu - oś. Nośność.....	161
5. Zastosowanie analizy dyskryminacyjnej przy badaniu nośności połączenia wciskowego zestawów kołowych wagonów.....	173
Bibliografia .....	178

## Część 8

*A. Vorobyov*

<b>Ocena wytrzymałości dynamicznej narzędzi tnących przy obróbce zestawów kołowych z podwyższoną twardością</b> .....	183
1. Niektóre problemy Rosyjskich kolej.....	183
2. Perspektywy wykorzystania nowych rodzajów kół na transporcie kolejowym Federacji Rosyjskiej .....	184
3. Metoda i warunki brzegowe do obliczenia wytrzymałości dynamicznej narzędzi tnących .....	194
4. Wpływ sztywności sprzętu.....	197
5. Uzasadnienie ograniczeń posuwu z względu na kryterium wydajności przy obróbce zgrubnej.....	197
6. Wpływ twardości koła na wydajność obróbki .....	199
7. Wykorzystanie tnącej płytki kształtu pryzmatycznego przy obróbce końcowej.....	200
8. Siły skrawania, moc i moment obrotowy, które powstają w procesie obróbki kół kolejowych .....	200
9. Obliczenia i analiza stanu naprężeń narzędzi skrawających.....	202
10. Wnioski.....	206
Bibliografia .....	207
Streszczenie.....	211

## СОДЕРЖАНИЕ

*А. Сладковски*

**Введение** ..... 19

Часть 1

*П. Фоленга, Т. Фиглюс, А. Вильк, Б. Лазаж, X. Мадей, Г. Перунь*

**Использование МКЭ при проектировании корпусов средств транспорта**..... 23

1. Метод проектирования корпусов с пониженной виброактивностью..... 23

2. КЭ модели корпусов ..... 25

3. Модальный анализ корпуса ..... 28

4. Экспериментальная верификация КЭ моделей ..... 30

5. КЭ моделирование корпусов ..... 31

5.1. Упрощенные численные модели ..... 31

5.2. Вычислительные модели ..... 34

6. Выводы..... 38

7. Благодарности ..... 39

Литература ..... 39

Часть 2

*П. Фоленга*

**Моделирование волновой зубчатой передачи** ..... 41

1. Компоненты и принципы эксплуатации волновой передачи..... 41

2. КЭ модели волновых передач..... 41

3. Собственные формы колебаний и собственные частоты волновых передач ..... 46

4. Новые материалы для волновых передач..... 48

5. Выводы..... 51

Литература..... 56

Часть 3

*А. Аль-Али, Я. Абдель-Нассер, А. Алираки*

**Анализ соударения подкрепленных плит** ..... 57

1. Модели соударения в современных публикациях..... 57

2. Выбор программного обеспечения основанного на МКЭ ..... 58

3. Моделирование воздействия на элементы конструкции корабля..... 58

3.1. Анализ соударения поперечно подкрепленных плит ..... 60

3.2. Анализ соударения продольно подкрепленных плит..... 62

4. Выводы..... 64

5. Благодарности ..... 64

Литература..... 64

Часть 4

*А. Сладковски, Д. Гонска, Т. Ханишевски*

**Использование метода конечных элементов при проектировании средств транспорта и оборудования для погрузочно-разгрузочных работ** ..... 67

1. Использование МКЭ для анализа проблем промышленного транспорта..... 67

2. Методология проектирования 3D моделей с использованием Autodesk Inventor .....	67
2.1. Основы управления проектами.....	68
2.2. Процесс создания 3D модели.....	68
2.3. 2D эскизы, 2D операции.....	69
2.4. Создание сборки, 3D операции.....	69
2.5. 2D документация.....	70
2.6. Реалистичное представление модели .....	72
2.7. Методология создания КЭ модели, формулировка проблемы на примере мостового крана .....	73
2.7.1. КЭ модель, препроцессор.....	73
2.7.2. Граничные условия .....	75
2.7.3. Задание нагрузок и материалов .....	77
2.7.4. Вычисления - решатель .....	79
2.7.5. Анализ результатов: распределения напряжений.....	79
2.7.6. Анализ результатов: перемещения и собственные формы колебаний.....	81
3. КЭ анализ новой несущей конструкции ленточного конвейера .....	83
4. Расчет блокады лифта для подвесного конвейера на линии продукции автозавода.....	88
5. Прочностной расчет специального технологического поддона .....	92
6. Прочностной расчет балок мостового крана.....	94
7. Моделирование влияния упрощений на напряженно-деформированное состояние несущей конструкции подъемной лебедки 450 т крана.....	97
Литература.....	109

## Часть 5

*Х. Бонковски, А. Посмык*

<b>Вспомогательный конечно - элементный анализ износа некоторых выбранных узлов технических средств транспорта .....</b>	<b>109</b>
1. Использование численных методов для расчета двигателей .....	109
2. Применение МКЭ для объяснения механизмов износа узлов автомобилей ....	110
2.1. Анализ износа поршневой группы .....	110
2.2. Создание 3D модели .....	113
2.3. Создание дискретной модели .....	113
2.4. Описание свойства материалов .....	116
2.5. Контроль качества КЭ сетки.....	116
2.6. Определение граничных условий.....	117
2.7. Выбор анализа .....	118
2.8. Интерпретация результатов .....	119
3. Результаты моделирования сборочного узла коленчатого вала.....	119
3.1. Распределение напряжений при стандартных условиях работы .....	119
3.2. Распределение напряжений при экстремальных условиях работы .....	122
3.3. Распределение напряжений при экстремальных условиях работы после попадания воды .....	123
4. Реальные результаты испытаний узла коленчатого вала.....	123
5. Анализ трибологического механизма износа контактных пар поршневое кольцо / цилиндр и юбка поршня / цилиндр.....	125
6. Выводы.....	130
Литература.....	130

## Часть 6

*М. Мирос, Т. Венгжин, Д. Хадрыш*

<b>Сравнительный анализ измерения напряжений в рамах грузовиков</b> .....	133
1. Возможные методы анализа напряжений в рамах грузовиков .....	133
2. Аналитические методы определения значения изгибающих моментов и напряжений в стрингерах рам самосвалов .....	137
3. Конечно-элементный анализ .....	138
4. Измерение интенсивности напряжений при помощи тензометрии .....	144
5. Выводы.....	147
Литература.....	147

## Часть 7

*С. Кротов, А. Сладковски*

<b>Прочность и надежность прессовых соединений железнодорожных колесных пар</b> .....	149
1. Улучшение способов сборки железнодорожных колес и осей для увеличения несущей способности .....	149
2. Эффективность соединения с гарантированным натягом под действием статического и динамического нагружения .....	150
3. Обзор теоретических решений прочностного анализа несущей способности соединения колесо - ось .....	151
4. Использование МКЭ для прочностного расчета при проектировании .....	153
4.1. Выбор метода расчета и КЭ программного обеспечения .....	155
4.2. Влияние условий нагружения на соединение вагонное колесо - ось. Несущая способность .....	161
5. Применение дискриминантного анализа при исследовании несущей способности прессового соединения колесных пар вагонов.....	173
Литература.....	178

## Часть 8

*А. Воробьев*

<b>Оценка динамической прочности режущего инструмента при обработке колесных пар повышенной твердости</b> .....	183
1. Некоторые проблемы Российских железных дорог .....	183
2. Перспективы использования новых типов колес на железнодорожном транспорте Российской Федерации.....	184
3. Методика и граничные условия для расчета динамической прочности режущего инструмента.....	194
4. Влияние жесткости оборудования .....	197
5. Обоснование ограничения подачи по критерию производительности на черновом проходе .....	197
6. Влияние твёрдости колеса на производительность обработки.....	199
7. Применения режущей пластины призматической формы на чистовом проходе.....	200
8. Силы резания, мощности и крутящие моменты, возникающие при обработке железнодорожных колёс.....	200
9. Расчет и анализ напряженного состояния режущего инструмента .....	202
10. Выводы.....	206
Литература.....	207



## INTRODUCTION

The finite element method (FEM) is currently one of the most often used methods for solving problems of mathematical physics. From the perspective of mathematics it is a way to replace the separate partial differential equations or their systems, which usually reduce the problem of mathematical physics, to systems of algebraic equations or ordinary differential equations of high order. I.e. are transformed of mathematical models with an infinite number of degrees of freedom for the model with a sufficiently large but finite number of degrees of freedom.

In the problems of solid mechanics it can be considered as the main method for analysis of stress-strain state of structures. Development of its fundamental provisions dates from the middle 50s of the 20th century. It was initially supposed to use this method for applications for solution of mechanical problems. Over time, the field of method application has significantly increased. In a certain sense, the FEM developers were ahead of their time, since the 50s there were no electronic computers that could implement solution more or less serious problems with using of the FEM.

Further development of computers has contributed to the fact that in 70s FEA has been used extensively in a number of leading research institutes and design bureaus, primarily related to military, space and aviation industry. Widespread personal computers in the 90s led to what appeared publicly available software (commercial and non-commercial) usage of FEM. Accordingly, such software has become available for most engineers, concerned with the strength and reliability of different designs.

In the early 21st century the development of FEM has reached an even higher level. This was due to the possibility of parallel computing processes with using of computer clusters and supercomputers, for which the solution of problems with FE meshes having tens millions of degrees of freedom no longer seems an impossibility. At the same time there is the integration of FEA into various CAD programs that allows the engineer, being in the same programming environment, to solve the problem of optimal design.

This has the advantage of FEM compared to other numerical methods (e.g., the finite difference method, the method of boundary integral equations, the Ritz method, the Bubnov - Galerkin method, the boundary element method and others) is due, above all, easy to set the complex boundary conditions, a relatively simple algorithms and other undeniable advantages. Of great importance is also the mathematical validity of applying this method to solving problems of different classes. Different authors have considered the problem of existence and uniqueness of solution of problems using FEM, the problem of convergence of iterative processes. Various solvers based on modern mathematical methods have developed.

Currently, FEA basics taught in the majority of technical colleges, and most commercial firms engaged in developing new technology presents to their employees along with

---

<sup>1</sup> Silesian University of Technology, Poland

knowledge of CAD systems, also claims ownership of the FEM, as a major tool. But here, unfortunately, are hidden the main problems of the finite element method at the present stage. For all its accessibility this method includes many "pitfalls". There are certain subtleties that are known only for well-trained professionals. At the same time is very important also an operational experience with one or another software, which uses the finite element method.

Said above was to some extent the basic idea of writing this book. The authors, although they operate in various countries deal with various problems of transport vehicles, using the finite element method to solve them. The authors are university professors, having a great experience teaching various disciplines where they are widely used finite element method. The authors did not set out to acquaint the reader with the fundamentals of the FEM. To do this, there are many other scientific and educational literature. Therefore, this book is recommended to readers who already know the basics of FEM. Nevertheless, some examples of the use of these bases for specific tasks can be found in this book. But the main purpose of authors was to inform the reader on the broad opportunities that the FEM provides for engineers to solve various problems associated with the construction vehicles. Among these tasks are not only problems of strength and reliability of the structures, but also the problem of technology of production and maintenance, tribology and other problems.

The structure of the book is to enable the reader to get acquainted with the achievements in the various modes of transport. The first two parts of it devoted to the gears used in automotive applications. However, these gears and methods for their analysis successfully could be used for other modes of transport.

The first chapter describes the results of a study aimed at developing guidelines for the design of transportation engineering housings gear with reduced vibroactivity. The reduction of gear vibroactivity is possible, inter alia, through the selection of the housing construction solution. In particular, the presented numerical studies show the impact of the adoption of a proper numerical model and boundary conditions on the results of calculations. In studies on the effects of housing ribbing on the vibroactivity the authors used the FEM.

In the second chapter examined 2D and 3D numerical models of mass-produced flexspline harmonic drive. In particular, it determines the characteristics and the natural frequencies for the developed flexspline models. We analysed the flexsplines, considering the CSD, CSG, HFUC and HFUS series. An analysis of two different material solutions (steel and steel-composite) was also conducted. The steel-composite flexspline as compared to conventional steel flexspline showed a decrease of maximum stress in the analysed sections. The calculations were based on the FEM.

Structural design of ships against collision requires prediction of the extent of damage to stiffened plates subjected to impact. In ship structures, stiffened plates are furnished with vertical or horizontal stiffeners to sustain conventional loads such as shearing, bending and local buckling. The consideration of collision in ship structural design is especially important for tankers where accidents may cause serious environmental pollution. In predicting the extent of collision damage, FE modelling of stiffened plates using ABAQUS software is applied to demonstrate the collision scenario. Typical stiffened plates of tankers in service with different configurations of stiffeners are used to examine absorbed energy for each one. The aim of this analysis, described in chapter 3, is to select the proper stiffener shape for absorbing more deformation energy. These analyses of stiffened plates will guide ship designers to properly select effective stiffener absorbing higher deformation energy when simulating full scale ship collisions.

The fourth chapter is devoted to various aspects of the design of industrial vehicles. Here we consider issues of transformation of geometric models in a FEM model, issues of a possible simplification of models during the specified simulation. As examples of FEM using con-

sidered load-bearing structures of bridge cranes, jointed frame structures of belt conveyor, a new construction of elevators rack lock in an industrial plant, a special mobile technological pallet. The greatest attention was given to the gantry crane, which is used to service the container terminal. We consider the stress-strain state of its basic parts and components, analyzed their own modes of vibration of metal frameworks.

In the fifth chapter was made attempts at explaining the wear mechanisms of some parts in an assembly of crankshaft with the use of FEM. Numerical analysis allow to determine local stress values which are essential for understanding the wear mechanisms of the analyzed contact. The obtained results of operational investigations prove that cracks and spallings of the micro and macro scale appear in areas with maximum stress and deformation. On the basis of the conducted simulation tests and FEM, analysis was found to be the right tool used to identify the areas of special wear hazard. The method also helps to explain the wear mechanisms of cast iron and composites used for manufacturing parts of a piston group.

The sixth chapter was devoted to analysis of stress intensity of stringer of the truck frame, by three different methods: analytical method, i.e. analysis of durability, analysis conducted by numerical simulation using a computer program of FEM and by strain gauges measuring of strain-stress condition. The analyses concerned the same frame of semi-trailer. They were conducted in the established conditions, giving them the respectively different values of stresses. It should be emphasized that discrepancy between the results of measurements is easy to interpretation. Each of these methods has some advantages and disadvantages.

In the seventh and eighth chapters, the authors analyze the problems of rail transport, and one of the most important and critical elements of it, which is the railway wheelsets. The seventh chapter examines the interaction between wheels and axles at press connections. We consider the stress-strain state of these elements under various types of loads, including thermal stress appears when shoes braking take place.

The article includes theoretical research of two-dimensional stress of cup and prismatic plates used for restoration of rolling profile of wheel pairs and the developed finite element representation with refined force and kinematic boundary conditions taking in view of thermo-mechanical approach. The technique offered can be used for many other researches in this direction.

The eighth chapter contains a theoretical research of two-dimensional stress state of hard-alloy axisymmetric cutters and prismatic plates used to recover a source profile of wheelsets. Developed three-dimensional FE model to determine the cutting forces for given kinematic boundary conditions, taking into account the thermo-mechanical approach. The developed method can be used for many other studies in this direction.

Another aspect of this book is its cross-national character. Work on the text of the book together scientists from different countries. Obviously, the solution of many problems of transport is very difficult to implement creative teams of one country. Not surprisingly, therefore, that the geography of research in this area is quite extensive. It can be confirmed and this book, whose authors are working in Russia, Kuwait and Poland.

Described in the book studies and calculations may be useful for scientists and engineers engaged in designing vehicles. The book can also be used in the training of specialists, students and post-graduate students in universities and transport high schools.



## PRZEDMOWA

Metoda Elementów Skończonych (MES) jest obecnie jedną z najczęściej stosowanych metod rozwiązywania problemów z fizyki matematycznej. Z punktu widzenia matematyki jest ona sposobem na zastąpienie oddzielnych równań różniczkowych cząstkowych i ich układów, do których zazwyczaj redukują się problemy fizyki matematycznej, na układy równań algebraicznych lub równań różniczkowych zwyczajnych wyższego rzędu. Czyli odbywa się transformacja modeli matematycznych o nieskończonej liczbie stopni swobody do modeli z wystarczająco dużą, ale skończoną liczbą stopni swobody.

Przy rozwiązywaniu problemów mechaniki ciała stałego MES może być słusznie postrzegana, jako główna metoda analizy stanu naprężeń i odkształceń różnych konstrukcji. Podstawowe założenia MES opracowano w połowie lat 50. XX wieku. Początkowo planowano wykorzystanie jej do rozwiązywania problemów mechanicznych. Z biegiem czasu, zakres stosowania metody znacząco wzrósł. W pewnym sensie, twórcy MES wyprzedzili swój czas, ponieważ w latach 50. nie było elektronicznych maszyn, za pomocą których można było rozwiązać mniej lub bardziej poważne problemy.

Rozwój komputerów spowodował, że w latach 70. MES znalazła szerokie zastosowanie w wielu wiodących instytutach badawczych i biurach konstrukcyjnych, pracujących przede wszystkim dla przemysłu zbrojeniowego, kosmicznego i lotniczego. Powszechne wykorzystanie komputerów osobistych w latach 90. doprowadziło do tego, że pojawiło się na rynku ogólnodostępne oprogramowanie (komercyjne i niekomercyjne) wykorzystujące MES. Oprogramowanie staje się więc dostępne dla większości inżynierów zajmujących się problemami wytrzymałości i niezawodności różnych konstrukcji.

Na początku XXI wieku rozwój MES osiągnął jeszcze wyższy poziom, dzięki wykorzystaniu procesów obliczeniowych, realizowanych równoległe za pomocą superkomputerów o strukturze klastrów, które mogą wykonywać zadania z siatkami MES, mającymi dziesiątki milionów stopni swobody. Jednocześnie postępuje integracja MES z systemami CAD, umożliwiając inżynierowi pracę w tym samym środowisku programowania, w celu rozwiązywania problemów projektowania optymalnego.

Te zalety MES, w porównaniu do innych metod numerycznych (np. metody różnic skończonych, metody brzegowych równań całkowych, metody Ritz'a, metody Bubnowa – Galerki-na, metody elementów brzegowych i innych), wynikają przede wszystkim z łatwego formułowania złożonych warunków brzegowych i stosunkowo prostej algorytmizacji. Duże znaczenie mają również matematyczne podstawy zastosowania MES do rozwiązywania problemów z różnych klas, opracowane przez wielu autorów, którzy rozpatrzyli problemy istnienia i jednoznaczności rozwiązań oraz problemy konwergencji procesów iteracyjnych. Opierając się na nich opracowano różne nowoczesne solwery.

Obecnie podstawy MES są w programach dydaktycznych w większości wyższych szkół technicznych, a firmy zaangażowane w rozwój nowych technologii wymagają od swoich pracowników, oprócz wiedzy na temat systemów CAD, również znajomości MES, jako główne-

go narzędzia pracy konstruktora. Niestety tutaj kryją się główne problemy związane z poprawnym stosowaniem MES. Przy ogólnej dostępności tej metody zawiera ona wiele „pułapek”. Istnieją pewne niuanse, które znają tylko dobrze wyszkoleni specjaliści, mający duże doświadczenie w pracy z danym oprogramowaniem, wykorzystującym MES.

Powyższy fakt był główną przesłanką do napisania tej książki. Autorzy, choć pracują w różnych krajach, zajmują się wykorzystaniem MES do rozwiązywania różnego rodzaju problemów, związanych ze środkami transportu. Są to profesorowie z dużym doświadczeniem w nauczaniu różnych dyscyplin, w których szeroko stosowana jest Metoda Elementów Skończonych. Celem autorów nie jest zapoznanie czytelnika z podstawami MES, ponieważ na ten temat wydano już odpowiednio dużo dobrych publikacji. Monografia jest zalecana dla czytelników, którzy znają już podstawy MES, jednak w niektórych przypadkach celem zachowania jasności wywodów nie dało się uniknąć nawiązań do teorii. Głównym celem autorów było przedstawienie czytelnikowi szerokich możliwości, które MES zapewnia inżynierowi do rozwiązania różnych problemów, związanych z projektowaniem maszyn transportowych. Wśród nich są nie tylko zagadnienia wytrzymałości i niezawodności bezpośrednio konstrukcji maszyny, ale również problemy technologii produkcji i eksploatacji, tribologii i inne.

Monografia umożliwia czytelnikowi poznanie zastosowań MES w odniesieniu do różnych środków transportu. Pierwsze dwie części poświęcone są przekładniom zębatym, stosowanym między innymi w przemyśle samochodowym. Jednak te części maszyn i metody ich analizy z powodzeniem mogą być używane w przypadku innych środków transportu.

Rozdział pierwszy opisuje wyniki badań, mających na celu rozwój metod projektowania korpusów przekładni zębatych z obniżonym poziomem drgań, przeznaczonych do maszyn transportowych. Zmniejszenie aktywności wibracyjnej można osiągnąć w szczególności poprzez wybór koncepcji projektu obudowy przekładni zębatej. W szczególności, w przedstawionych badaniach numerycznych przeanalizowano wpływ doboru odpowiednich modeli numerycznych i warunków brzegowych na wyniki obliczeń. MES została użyta przez autorów do analizy drgań korpusów przekładni, wzmocnionych żebrami usztywniającymi.

W rozdziale drugim przedstawiono badania przekładni falowych, przy wykorzystaniu modeli MES 2D i 3D. W szczególności określono charakterystyki i częstotliwości drgań własnych elementów przekładni falowych. Zostało przeanalizowanych wiele przekładni falowych serii CSD, SWW, HFUC i HFUS. Analizę przeprowadzono dla dwóch różnych rozwiązań projektowych w zakresie materiałów (stali lub stal - kompozyt). Przekładnie falowe ze stali i kompozytu, w porównaniu do tradycyjnych konstrukcji stalowych, wykazały spadek naprężeń maksymalnych w analizowanych, niebezpiecznych przekrojach.

Przy projektowaniu konstrukcji statków, w celu zmniejszenia strat związanych z ich kolizjami wymagane jest przewidywanie stopnia uszkodzenia płyt nośnych, które są narażone na ewentualne uderzenia. W konstrukcji statków morskich płyty te wyposażone są w dodatkowe żebra usztywniające pionowe lub poziome, dla przeciwdziałania obciążeniom eksploatacyjnym, takim jak: ścinanie, zginanie lub odciążenia lokalne. Analiza wpływu zderzenia na projektowany statek jest szczególnie ważna w przypadku tankowców, gdzie wypadki mogą powodować poważne zanieczyszczenie środowiska. Aby przewidzieć zakres uszkodzeń w wyniku kolizji, modelowano rozpatrywane płyty przy użyciu oprogramowania ABAQUS. Typowe płyty nośne tankowców o różnej konstrukcji usztywnień badano numerycznie określając w każdym przypadku ilość pochłanianej energii. Celem tych badań, opisanych w rozdziale 3, był wybór odpowiedniej formy żebra usztywniającego, pozwalającej na maksymalną absorpcję energii uderzenia. Badania te pomogą przeprowadzić właściwy dobór konstrukcji płyt przez projektantów statków, żeby ich skuteczna sztywność nadawała się do maksymalnego pochłaniania energii odkształcenia podczas pełnej symulacji kolizji statków.

Czwarty rozdział jest poświęcony różnym aspektom projektowania pojazdów przemysłowych. Rozpatrzono tutaj problem możliwych uproszczeń przy przekształcaniu modeli geometrycznych na modele MES. Jako przykłady wykorzystania MES rozpatrzono konstrukcje nośne suwnic, przegubowe konstrukcje ram taśmociągów, nową konstrukcję blokady windy w zakładzie przemysłowym, specjalne ruchome palety technologiczne. Największą uwagę zwrócono na suwnicę kołową, która jest używana do obsługi terminali kontenerowych. Przeanalizowano stany naprężeń i odkształceń jej podstawowych części i komponentów, analizie poddano własne formy drgań ustroju nośnego.

W piątym rozdziale za pomocą Metody Elementów Skończonych podjęto próbę wyjaśnienia mechanizmu zużycia niektórych części mechanizmu tłokowo-korbowego. Analiza numeryczna pozwoliła określić lokalne wartości naprężeń, które są istotne dla zrozumienia mechanizmów zużycia analizowanych stref kontaktu. Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że pęknięcia i złamania na mikro- i makropoziomie pojawiają się w miejscach o najwyższym poziomie naprężeń i odkształceń. Na podstawie badań i symulacji, za pomocą analizy MES udowodniono, że do określenia obszarów szczególnie narażonych na zużycie, zastosowano odpowiednie narzędzia badawczego. Metoda pomaga też wyjaśnić mechanizmy zużycia żeliwa i materiałów kompozytowych, stosowanych do produkcji części zespołu tłoka.

Rozdział szósty poświęcony jest analizie intensywności naprężeń w belkach ramy ciężarówki, które były analizowane za pomocą trzech różnych metod: analitycznej, numerycznej symulacji, przeprowadzonej przy użyciu programu komputerowego MES i czujników tensometrycznych do pomiaru stanów odkształceń i naprężeń. Analizę przeprowadzono dla tych samych części i warunków załadunku przyczepy. Pomimo faktu, że wszystkie badania zostały wykonane dla warunków ustalonych, otrzymano różne wartości naprężeń wynikające z wad i zalet każdej z metod. Należy podkreślić, że różnice pomiędzy pomiarami można łatwo interpretować. Każda z metod miała swoje wady i zalety.

W rozdziałach siódmym i ósmym autorzy poddają analizie problemy występujące w transporcie kolejowym, w tym związane z jednym z najważniejszych i najbardziej krytycznych elementów – zestawem kołowym. W rozdziale siódmym bada się połączenie wciskowe pomiędzy kołem a osią. Wyznaczony zostały stany naprężeń i odkształceń tych elementów w różnych warunkach obciążenia, w tym przy uwzględnieniu obciążenia termicznego, które pojawia się wskutek hamowania klockowego.

Rozdział ósmy zawiera badania teoretyczne dwuwymiarowego stanu naprężeń dla osiowo-symetrycznych i przyrównanych narzędzi tnących, wykonanych z twardych stopów i używanych do przywrócenia oryginalnych profili kołowych. Opracowano także trójwymiarowy model MES, w celu określenia siły skrawania dla zadanych, kinematycznych warunków brzegowych, biorąc pod uwagę podejście termiczno-mechaniczne. Opracowana metoda może być używana do wielu innych badań w tym zakresie.

Innym aspektem tej publikacji jest jej międzynarodowy charakter. Prace nad tekstem książki połączyły naukowców z różnych krajów. Oczywiście, rozwiązanie wielu problemów związanych z transportem jest bardzo trudne do realizacji dla zespołów badawczych z jednego kraju. Nic dziwnego zatem, że geografia badań w tej dziedzinie jest bardzo szeroka. Potwierdzeniem tego może być i ta monografia, której autorzy pracują w Rosji, Kuwejcie i Polsce.

Opisane w monografii badania i obliczenia mogą być przydatne dla naukowców i inżynierów zajmujących się projektowaniem różnych środków transportu. Publikacja może być również wykorzystana w procesie nauczania specjalistów, studentów i doktorantów specjalności transportowych na wyższych uczelniach.

## ВВЕДЕНИЕ

Метод конечных элементов (МКЭ) в настоящее время является одним из наиболее часто используемых способов решения задач математической физики. С позиции математики это способ замены отдельных уравнений в частных производных или их систем, к которым обычно сводятся задачи математической физики, на системы алгебраических уравнений или обычных дифференциальных уравнений большого порядка. Т.е. происходит преобразование математических моделей с бесконечным числом степеней свободы на модели с достаточно большим, но конечным числом степеней свободы.

В задачах механики деформируемого твердого тела его можно заслуженно считать основным способом анализа напряженно-деформированного состояния конструкций. Разработка его основополагающих положений относится к середине 50-х годов XX века. Изначально предполагалось использование этого метода для применения к решению задач механики. Со временем поле применения метода существенно расширилось. В определенном смысле разработчики МКЭ опередили свое время, поскольку в 50-е годы не существовали электронно-вычислительные машины, способные реализовать решение более или менее серьезных задач с использованием МКЭ.

Дальнейшее развитие ЭВМ способствовало тому, что в 70-е годы МКЭ уже активно использовался в ряде ведущих научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро, в основном связанных с военной, космической и авиационной промышленностью. Широкое распространение персональных компьютеров в 90-е годы привело к тому, что появилось общедоступное программное обеспечение (коммерческое и некоммерческое), использующее МКЭ. Соответственно, такое программное обеспечение стало доступно большинству инженеров, занимающихся проблемами прочности и надежности различных конструкций.

В начале XXI века развитие МКЭ достигло еще более высокого уровня. Это было обусловлено возможностью распараллеливания вычислительных процессов с использованием компьютерных кластеров и мощных суперкомпьютеров, которых решение задач с КЭ сетками, имеющими десятки миллионов степеней свободы, уже не представляется чем-то невозможным. Одновременно наблюдается интеграция МКЭ в различные САД программы, что позволяет инженеру, находясь в одной программной среде, решать задачи оптимального проектирования.

Такое преимущество МКЭ по сравнению с другими численными методами (например, методом конечных разностей, методом граничных интегральных уравнений, методом Рунге, методом Бубнова – Галеркина, методом граничных элементов и другими) обусловлено, прежде всего, легкостью задания сложных граничных условий, относительно простой алгоритмизацией и другими бесспорными преимуществами. Большое значение имеет также математическая обоснованность применения метода к решению задач разных классов. Различными авторами рассмотрены проблемы существования и

единственности решения задач с использованием МКЭ, проблемы сходимости итерационных процессов. Разработаны различные решатели, базирующиеся на современных математических методах.

В настоящее время основы МКЭ преподаются в большинстве технических ВУЗов, а большая часть коммерческих фирм, занимающихся разработкой новой техники, предъявляет к своим сотрудникам наряду со знанием систем САД, также требования владения МКЭ, как одним из основных инструментов. Но именно здесь, к сожалению, скрыты основные проблемы использования МКЭ на современном этапе. При всей своей общедоступности метод содержит множество «подводных камней». Существуют определенные тонкости, которые известны только хорошо подготовленным специалистам. При этом большое значение имеет также опыт работы с тем или иным программным обеспечением, использующим МКЭ.

Сказанное выше явилось в какой-то степени основной идеей написания данной книги. Ее авторы, хотя работают в разных странах, занимаются различными проблемами транспортных машин, используя для их решения МКЭ. Авторы являются преподавателями университетов, имея достаточно большой опыт преподавания различных дисциплин, в которых широко используется МКЭ. Авторы не ставили своей целью ознакомить читателей с основами МКЭ. Для этого есть много другой научной и учебной литературы. Поэтому данную книгу стоит рекомендовать читателям, которые уже знакомы с основами МКЭ. Тем не менее, определенные примеры использования данных основ для решения конкретных задач можно найти в рассматриваемой книге. Главной же целью авторов было информирование читателя о тех широких возможностях, которые МКЭ предоставляет инженеру для решения различных задач, связанных с конструированием транспортных машин. Среди этих задач не только проблемы прочности и надежности самих конструкций, но и задачи технологии производства и эксплуатации, проблемы трибологии и другие.

Структура книги такова, чтобы позволить читателю познакомиться с достижениями в различных видах транспорта. Первые две ее части посвящены зубчатым передачам, используемым в автомобилестроении. Тем не менее, эти зубчатые зацепления и методы их анализа с успехом могли бы использоваться для других видов транспорта.

В первой главе рассмотрены результаты исследований, направленных на разработку принципов конструирования корпусов зубчатых передач, предназначенных для транспортных средств с уменьшенным уровнем вибрации. Сокращение вибрационной активности передач можно достичь, в частности, путем выбора конструкционного решения для корпуса редуктора. В частности, представленные численные исследования рассматривали влияние выбора соответствующей численной модели и граничных условий на результаты расчетов. Метод конечных элементов был использован авторами для анализа вибрации корпусов редукторов усиленных ребрами жесткости.

Во второй главе были изучены 2D и 3D численные модели волновых передач массового производства. В частности, были определены характеристики и собственные частоты для разработанных моделей волновых передач. Были проанализированы волновые передачи серий CSD, CSG, HFUC и HFUS. Был проведен анализ для двух различных конструкционных решений в плане использования материала (сталь и сталь - композит). Волновые передачи из стали и композита по сравнению с обычными стальными конструкциями показали снижение максимальных напряжений в анализируемых сечениях. Расчеты были основаны на применении МКЭ.

При проектировании конструкций кораблей для уменьшения повреждений, связанных с их столкновениями, требуется прогнозирование масштабов ущерба, причиненного несущим плитам, подверженным возможности удара. В судовых конструкциях не-

сущие плиты оснащены вертикальными или горизонтальными ребрами жесткости для противодействия обычным нагрузкам, таким как сдвиг, изгиб или локальное воздействие. Рассмотрение воздействия столкновения на судовые конструкции особенно важно для танкеров, где несчастные случаи могут привести к серьезным загрязнениям окружающей среды. Для прогнозирования степени повреждения при столкновении использовалось КЭ моделирование несущих плит с использованием программного обеспечения ABAQUS. Типичные несущие плиты танкеров с различными конфигурациями ребер жесткости были выбраны для изучения поглощенной энергии для каждого из таких элементов. Целью данных исследований, описанных в главе 3, являлся выбор надлежащей формы ребер жесткости для максимального поглощения энергии деформации. Эти анализы несущих плит будут способствовать правильному выбору конструкторами кораблей эффективных жесткостей максимально поглощающих энергию деформации при полномасштабном моделировании столкновения кораблей.

Четвертая глава книги посвящена различным аспектам проектирования промышленного транспорта. Здесь рассмотрены вопросы преобразования геометрических моделей в модели МКЭ, вопросы возможного упрощения моделей при проведении указанного моделирования. В качестве примеров применения МКЭ рассмотрены несущие конструкции мостовых кранов, сочлененные рамные конструкции конвейеров, новая конструкция блокады лифта на промышленном предприятии, специальный передвижной технологический поддон. Наибольшее внимание было уделено козловому крану, который используется для обслуживания контейнерного терминала. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние его основных деталей и узлов, проанализированы собственные формы колебаний основных металлоконструкций.

В пятой главе были сделаны попытки с использованием МКЭ объяснить механизмы износа некоторых деталей сборочного узла коленчатого вала. Численный анализ позволяет определить локальные значения напряжения, которые важны для понимания механизмов износа анализируемых контактных зон. Полученные результаты исследований позволяют доказать, что трещины и сколы на микро- и макроуровне появляются в районах с максимальными уровнями напряжений и деформаций. На основании проведенных тестов и моделирования при помощи анализа МКЭ доказано, что для идентификации областей, представляющих особый риск износа, используется правильный инструмент. Метод также помогает объяснить механизм износа чугуна и композиционных материалов, использующихся для изготовления частей поршневой группы.

Шестая глава была посвящена анализу интенсивности напряжений несущих балок рамы грузового автомобиля, которые были проанализированы при помощи трех различных способов: аналитического метода, проведенного численного моделирования с использованием компьютерной программы МКЭ и тензодатчиков для измерения напряженно-деформированного состояния. Анализ проводился для тех же частей и условий нагружения полуприцепа. Несмотря на то, что для них были заданы те же самые выбранные условия, значения напряжений определенные далее были различны. Следует подчеркнуть, что расхождения между результатами измерений можно было легко интерпретировать. Каждый из представленных методов имел свои преимущества и недостатки.

В седьмой и восьмой главах авторы анализируют проблемы железнодорожного транспорта, причем одного из наиболее важных и ответственных его элементов, каковым является колесная пара. В седьмой главе рассматривается взаимодействие колеса и оси в прессовом соединении. Рассмотрено напряженно-деформированное состояние этих элементов под воздействием различных видов нагрузок, в том числе термической нагрузки, появляющейся при колодочном торможении.

Восьмая глава содержит теоретическое исследование двумерного напряженного состояния твердосплавных чашек и призматических пластин, используемых для восстановления исходного профиля колесных пар. Разработана трехмерная КЭ модель для определения силы резания при заданных кинематических граничных условиях с учетом термомеханического подхода. Разработанная методика может быть использована для многих других исследований в этом направлении.

Еще одним аспектом данной монографии является ее межнациональный характер. Работа над текстом книги объединила ученых разных стран. Очевидно, что решение многих задач транспорта очень сложно осуществить творческим коллективам одной страны. Не удивительно поэтому, что география научных исследований в рассматриваемой области достаточно широка. Это может подтвердить и данная книга, авторы которой работают в России, Кувейте и Польше.

Описанные в книге исследования и расчеты могут оказаться полезными для научных сотрудников и инженеров, работающих в области проектирования средств транспорта. Книга также может быть использована в процессе подготовки специалистов, студентов и аспирантов транспортных ВУЗов.