

## HISTORIA I PERSPEKTYWY ZASTOSOWAŃ METOD ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH W BADANIACH NIENISZCZĄCYCH MATERIAŁÓW

Marek AUGUSTYNIAK<sup>1,2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział FTiMS, Katedra Fizyki Ciała Stałego

tel: 58 347 14 95 e-mail: maugustyniak@mif.pg.gda.pl

2. DES ART biuro projektowo-badawcze, Batorego 28-32 Gdynia

**Streszczenie:** Praca zawiera niedokonywany do tej pory przegląd zastosowań Metod Elementów Skończonych w interdyscyplinarnym i rozwijającym się stale obszarze nauki i inżynierii jakim są Badania Nieniszczące Materiałów (NDT). W pierwszej kolejności przypomniane są krótko założenia i klasyfikacja rodziny Metod Elementów Skończonych, wraz z obszarami typowych zastosowań i listą inherentnych ograniczeń i trudności.

Główna część pracy opisuje rolę MES we wspomaganiu różnych obszarów NDT: termografii, metod wibroakustycznych i elektromagnetycznych. Pokazane są wybrane literaturowe oraz autorskie wyniki modelowania, służące kolejno: lepszemu zrozumieniu / rozdzieleniu zjawisk, kalibracji układów pomiarowych i wreszcie dalszemu usprawnianiu komputerowych modeli, tak, aby coraz bardziej złożone zagadnienia odwrotne stawały się rozwiązywalne.

**Słowa kluczowe:** metoda elementów skończonych, badania nieniszczące.

### 1. WPROWADZENIE

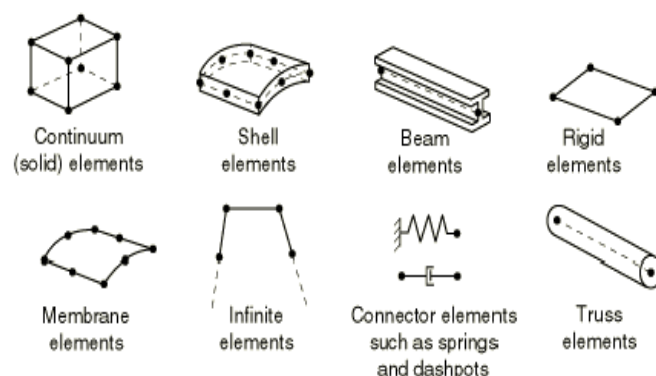
Metoda elementów skończonych do maksimum wykorzystuje rosnące moce komputerów. W oparciu o fundamentalne równania fizyczne, zaawansowane procedury przekształcania macierzy oraz akceleratory graficzne zmienia stację roboczą w wirtualne laboratorium. Wyniki numerycznych testów stosuje obecnie każda branża przemysłu: od transportu poprzez budownictwo po wydobywanie surowców czy produkcję leków. Choć bibliografie zastosowań MES w rozmaitych kontekstach jest już dostępna dzięki systematycznym pracom Jaroslava Mackerle [1], wciąż nieopisane są poczesne zasługi i perspektywy modelowania dla rozwoju metod badań nieniszczących.

### 2. METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH - STAN AKTUALNY

#### 2.1. Klocki LEGO dla inżyniera i naukowca

Technika MES jest rozwijana teoretycznie od lat 40-tych XX wieku, natomiast rozwój jej implementacji rozpoczął się w latach 70-tych. Pojawiły się do dziś stosowane i udoskonalane programy komputerowe: NASTRAN, ANSYS, ABAQUS, COSMOS, HYPER-

WORKS. Warto przy tym zaznaczyć fundamentalny teoretyczny jak i praktyczny wkład prof. O. C. Zienkiewicza [2], zmarłego w roku 2009 w USA. Metoda Elementów Skończonych zdobyła popularność i przewagę nad np. Metodą Elementów Brzegowych (MEB) dzięki prostocie koncepcji oraz uniwersalności. Z kilku zaledwie typów elementów, złączonych w węzłach (Rys. 1) i wyposażonych w tzw. funkcje kształtu oraz stopnie swobody, utworzyć można w zasadzie dowolny fizyczny obiekt lub układ.



Rys. 1 Rodziny elementów w analizach MES

Znane z podręczników zestawy równań rozwiązywane są przez wyrafinowany algorytm, dając w wyniku realistyczne odwzorowanie ruchu, naprężeń, pól magnetycznych, temperatur itd. Uniwersalność metody bierze się m. in. z przekształcania rozmaitych problemów fizycznych w szereg podobnych w formie, zlinearyzowanych równań macierzowych (Tablica 1).

Tablica 1. Zlinearyzowana forma równań fizycznych

$\frac{\delta}{\delta x} \left\langle v \frac{\delta A}{\delta y} \right\rangle + \frac{\delta}{\delta y} \left\langle v \frac{\delta A}{\delta x} \right\rangle = -J$	$[A]\{X\} = \{B\}$ (4)
$[M] \left\langle \frac{d^2 u}{dt^2} \right\rangle + [K]\langle u \rangle = \langle F_{ext} \rangle$	
$\frac{\delta}{\delta x} \left\langle v \frac{\delta A}{\delta y} \right\rangle + \frac{\delta}{\delta y} \left\langle v \frac{\delta A}{\delta x} \right\rangle = -J$	

Choć mowa o "metodzie", poprawniej należałoby się odnosić do całej rodziny "metod". Dla przykładu, identyczny w kształcie model posiadający pewien rozkład sztywności i masy można przeliczyć statycznie, bezwłasnościowo, modalnie, i wreszcie zderzeniowo, za każdym razem stosując nieco odmienną metodykę.

Umowna klasyfikacja MES ze względu na fizykę zjawisk przedstawiona jest w Tab. 2.

Tablica 2. Klasyfikacja zagadnień rozwiązywanych MES

Klasa zagadnień	Podpodział /przykłady
Wytrzymałościowe liniowe lub nieliniowe	<u>Podpodział w rodzaju ruchów</u> - quasi statyczne, - drgania ustalone, - drgania niestalone - mechanizmy i zderzenia
Ciepłne, liniowe lub nieliniowe	<u>Mechanizmy transportu ciepła</u> - kondukcyjny, - konwekcyjny, -radiacyjny
Elektromagnetyczne a) statyczne, b) niskoczęstotliwościowe c) wysokoczęstotliwościowe	<u>Obszary modelowania</u> - przepływ prądów, - ekranowanie, - indukcja, - zagadnienia telekomunikacyjne
Sprężone, tzw. Multiphysics	<u>Przykłady</u> - dylatacja i naprężenia ciepłne - spawanie (elektrody, chłodzenie) - siłowniki elektromagnetyczne

W ukazanej klasyfikacji świadomie pominięta jest ważna dziedzina obliczeń: CFD (*Computational Fluid Dynamics*, czyli numeryczna mechanika płynów). Choć ogromna większość jej implementacji opiera się na sformułowaniu MOS (Metoda Objętości Skończonych), istnieją też udane narzędzia do obliczania przepływów w oparciu o MES, np. AcuSolve firmy Altair.

## 2.2. Im dalej w las ...

Choć początkującego użytkownika MES może zachwycać łatwość budowy modeli i uzyskiwania "ładnych" wyników, nie wolno zapominać o pułapkach i trudnościach związanych z odpowiedzialnym stosowaniem tego

potężnego narzędzia matematycznego. Podstawowymi błędami są: rezygnacja z weryfikacji doświadczalnej wyników, oparcie się na zgrubnych "internetowych" danych materiałowych oraz nieświadome zignorowanie istotnych nieliniowości czy sprzężeń. Dodatkowo trzeba pamiętać o wyzwaniach specyficznych dla danej dziedziny obliczeń, np.:

- zagadnienia zmęczeniowe i mechanika pęknięcia wymagają siatki o szczególnie wysokiej jakości
- propagacja fali sprężystej (zwł. akustyka) wymaga, przynajmniej w klasycznych sformułowaniach MES, bardzo drobnych elementów, o rozmiarze rzędu 1/10 długości najkrótszej fali
- za obliczeniami elektromagnetycznymi stoi relatywnie skomplikowana, zróżnicowana teoria fizyczna
- problemy ciepłne często wymagają sprzężenia z CFD, gdyż uproszczona konwekcja bywa niewystarczająca.

Jeszcze trudniejsze jest wdrażanie obliczeń wielodzielinowych (Multiphysics), które wymaga efektywnego łączenia bardzo zróżnicowanych algorytmów, rozwijanych niekiedy przez konkurencyjne firmy.

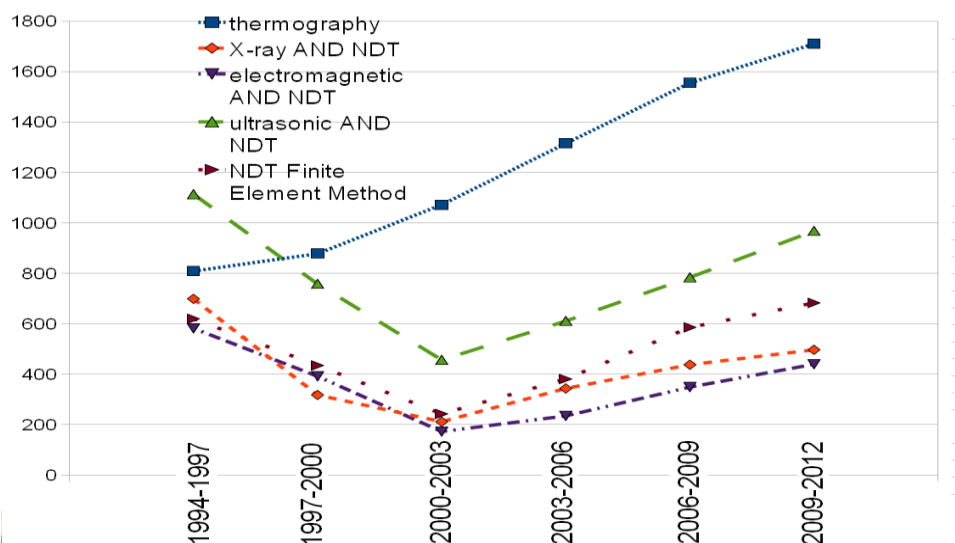
Mimo ciągłego rozwoju hardware/software, wobec stałej presji "szybciej-więcej-dokładniej" płynącej ze świata przemysłu, nie znika problem zapotrzebowania na zasoby: RAM/CPU/HDD. Jednocześnie warto podkreślić, że nawet super-klastery z zestawem najnowszego software nie zastąpi doświadczonych inżynierów i realnych założeń.

## 3. MES JAKO WSPARCIE DLA NDTE

### 1.1. NDTE: tam sięgaj, gdzie wzrok nie sięga

Dziedzina NDTE (*Nondestructive Testing and Evaluation*) skupia się na eksperymentalnym wyznaczaniu mechanicznego stanu i właściwości danego materiału / obiektu przemysłowego, bez naruszenia go w sposób nieodwracalny. Od ponad stu lat rozwijane są techniki laboratoryjne oraz in-situ. W przeważającej mierze służą defektoskopii części stalowych, jednak coraz częstsze są badania betonów czy kompozytów, z obrazowaniem 3D i elementami miernictwa. Osobnym, fascynującym, ale nierozważanym tu obszarem NDTE jest diagnostyka medyczna.

Rysunek 2 przedstawia kwerendy bibliograficzne w czasopiśmie wydawnictwa Elsevier, w okresach



Rys. 2. Kwerendy w bazie Elsevier / Springer dotyczące wiodących technik NDTE

trzyletnich. Badane są liczby publikacji odwołujących się do jednej z czterech wiodących technik NDTE: termografii, promieniowania X, elektromagnetyzmu oraz ultrasonografii. Charakterystyczny i trudny do wytłumaczenia jest spadek liczby publikacji nt. NDTE na przełomie wieków, za wyjątkiem termografii, która zdaje się cieszyć największą, i stale rosnącą popularnością. Przy względnych porównaniach należy jednak zachować ostrożność, gdyż użycie synonimicznej kwerendy (np. "infrared defectoscopy") daje śladową liczbę trafień, sugerując mylnie niewielkie zainteresowanie badaczy.

Wśród olbrzymiej liczby artykułów przyczynkowych, przedstawiających drobne usprawnienia w wybranej gałęzi NDTE, najcenniejsze wydają się miarodajne syntezy, prace przekrojowe. Publikacja [3] stanowi syntezę NDTE materiałów kompozytowych, z realistyczną prognozą dalszej japońskiej przewagi nad badaczami europejskimi. [4] jest przykładem porównawczego studium przypadku z użyciem różnorodnych technik. Autorzy podkreślają wagę komplementarnego stosowania pól magnetycznych, promieniowania i sonaru do detekcji wad w zbrojeniu stalowym przykrytym grubą warstwą betonu. Wreszcie [5] skupia się na NDTE magnetycznym, zestawia metodologie oparte na wycieku pola z pomiarami efektu Barkhausena, podkreślając przy tym - słusznie - rolę modelowania MES.

### 3.2. MES/NDTE: skalibrować, zrozumieć, odtworzyć

W analizie literatury badawczej, w której Metoda Elementów Skończonych stosowana jest w kontekście badań nieniszczących, zwraca uwagę różnorodność algorytmów modelowania, w naturalny sposób odpowiadająca bogactwu współczesnych technik NDTE. Prądy wirowe modelowane są w [6] i [7], piezoelektryczne i elektryczne NDTE znajdują wsparcie w symulacji w [8], [9], zaś elektromagnetyczne fale są modelowane w [10] i [11]. Statyczny wyciek pola

magnetycznego oraz dynamiczne efekty sprzężone (np. emisja magnetoakustyczna) badana była w pracach Autora, np. [12].

MES w kontekście NDTE przyjmuje zazwyczaj jedną z trzech ról. Najcenniejszą i często niezastąpioną jest pomoc w rozwiązaniu zagadnienia odwrotnego poprzez generowanie bazy rozwiązań zagadnienia prostego. Za zagadnienie odwrotne uważa się zwykle próbę dedukcji stanu materiału na podstawie mierzonych sygnałów, zaś zagadnieniem prostym jest zmierzenie (lub obliczenie) sygnału przy dokładnie znanej charakterystyce wnętrza badanego obiektu. Na uwagę zasługują tu prace: [13] (termografia), [14] (ultrasonografia), [15] (drżania własne) i [6] (elektromagnetyzm). Zgodnie z oczekiwaniami najrzadsze są próby połączenia MES z technikami rentgenowskimi. Nawet artykuł zawierający w nazwie "tomografię dyfrakcyjną" [16] opisuje w rzeczywistości modelowanie MES rozproszenia fal mechanicznych. Modelowanie daje wgląd w zjawiska, których nie da się rozdzielić i bezpośrednio zmierzyć, przy czym jest to szczególnie godne docenienia w modelowaniu zmiennych pól magnetycznych w przemysłowych konstrukcjach ze stali ferromagnetycznej.

Część prac wykorzystuje MES do kalibracji czy zwiększenia czułości układów pomiarowych. Najczęściej badany jest przy tym wpływ geometrii obiektu lub efekt odsunięcia sondy, tzw. lift-off. Trzeba wreszcie wspomnieć wcale nie rzadkie badania nad samą metodą elementów skończonych, mierzące od przyspieszenia obliczeń lub uwzględnienia nowych, istotnych efektów.

Ważnym, choć kłopotliwym obszarem interakcji MES i NDTE jest generacja i pomiar fal sprzężystych. Tablica 3 przedstawia użyteczną klasyfikację tego typu zagadnień.

Tablica 3 Klasyfikacja technik NDTE / algorytmów MES opartych na propagacji fal mechanicznych

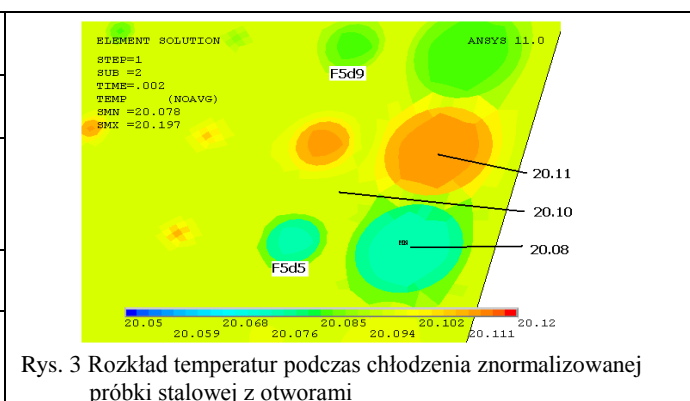
Zjawisko, zakres	Klucz angielski	Trudności modelowania
Drgania globalne, rezonansowe, ustalone	<i>Acoustics, Modal vibration, Resonance</i>	Relatywnie łatwe zagadnienie w klasycznej MES, oparte zwykle na rozwiązaniu tzw. zagadnienia własnego; zakłada stałe, długotrwałe wymuszenie.
Propagacja paczki fal sprzężystych, częstotliwości rzędu 1Hz -- 10kHz	<i>Attenuation, Acoustic Wave, Elastic Wave</i>	Obliczenia czaso-przestrzenne propagacji fali wymagają algorytmiki jawnej (Explicit) lub metod specjalnych. Warunek na wielkość elementu powoduje w klasycznej MES wymagania CPU/RAM rzędu $f^3$ , gdzie $f$ jest maksymalną rozważaną częstotliwością.
Propagacja fali ultradźwiękowej	<i>Ultrasonic, Ultrasound</i>	Klasyczna MES jest na dzień dzisiejszy praktycznie nieużyteczna. Trwają liczne badania nad algorytmami typu SFEM ( <i>Spectral Finite Element Method</i> ).

Istnieje szereg prac z pogranicza rozważanego duetu MES/NDTE. Przykładem może być [17], gdzie standardowe wyznaczanie stanu naprężeń w konstrukcji z defektami jest nieco na wyrost określane jako "system ekspercki wspomagający inżyniera NDTE". Inny przykład graniczny stanowi stosowanie MES do precyzyjniejszej kalibracji metodyki Mathara, która nie jest już techniką stricte nieniszczącą.

### 3.3 Wybrane prace własne

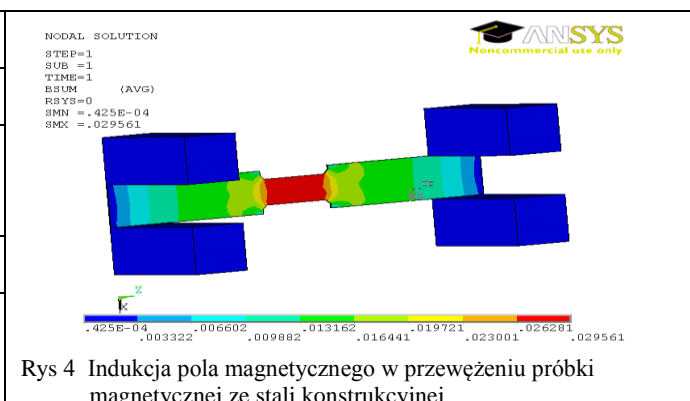
Poniżej zestawiam cztery obszary NDTE, w których zastosowałem modelowanie MES, z użyciem oprogramowania ANSYS lub HyperWorks / RADIOSS. W każdym przypadku istotna jest znajomość kontekstu oraz oszacowanie poziomu trudności obliczeń.

Rodzaj NDT/E	<b>Defektoskopia termograficzna</b>
Rodzaj MES	Obliczanie ciepłe nieustalone, bez promieniowania
Wymagania CPU/RAM; trudności	Średnie; Trudne: konieczne modelowanie historii czasowej, modelowanie 3D Łatwe: obszar relatywnie ograniczony
Korzyści z modelowania	Umożliwia rozwiązywanie problemów odwrotnych
Kontekst	Nawiązanie do eksperymentu badaczy japońskich (Kubo et al.) Tu: badania podstawowe



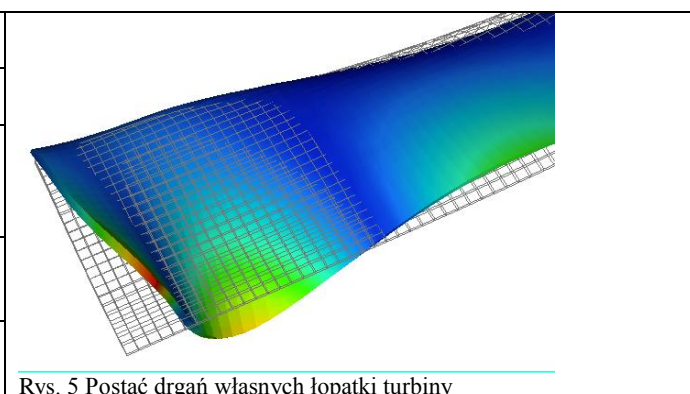
Rys. 3 Rozkład temperatur podczas chłodzenia znormalizowanej próbki stalowej z otworami

Rodzaj NDT/E	<b>Defektoskopia / miernictwo z pomocą magnetycznego pola rozproszonego</b>
Rodzaj MES	Zagadnienie magnetostatische, z udziałem namagnesowania utrwalonego
Wymagania CPU/RAM; trudności	Średnie; Trudne: znaczny model 3D, precyzja wymaga gęstej regularnej siatki Łatwe: modelowanie statyczne, liniowe
Korzyści z modelowania	Kalibracja pomiaru pola, zwłaszcza w konstrukcjach i detalach o skomplikowanych kształtach
Kontekst	Wejście w ożywiony, aktualny spór o dużym znaczeniu praktycznym (krytyka postulatów i działalności komercyjnej prof. Dubowa)



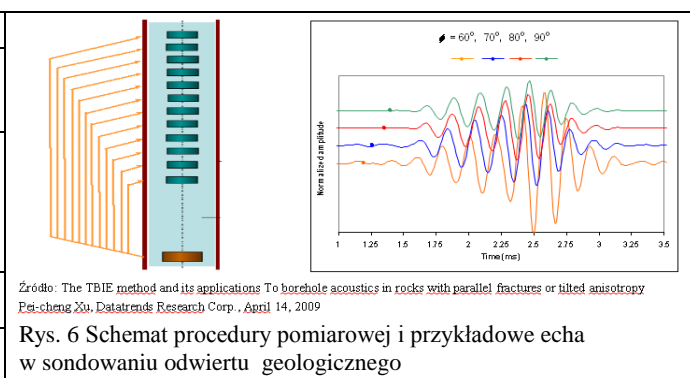
Rys 4 Indukcja pola magnetycznego w przewężeniu próbki magnetycznej ze stali konstrukcyjnej

Rodzaje NDT/E	<b>Wibrodefektoskopia</b>
Rodzaje MES	Analiza modalna / z ewentualnym diagramem Campbella
Wymagania CPU/RAM; trudności	Średnie / znaczne Trudne: bardzo wysokie wymagania w przypadku realistycznych modeli całych turbin Trudne: problem reprezentatywnych obciążeń
Korzyści z modelowania	Przewidywanie charakterystyk drgań dowolnych konstrukcji zdegradowanych; Określenie faktycznej dokładności metodyki NDT
Kontekst	Współpraca z ALSTOM



Rys. 5 Postać drgań własnych łopatki turbiny

Rodzaje NDT/E	<b>Defektoskopia / miernictwo geoakustyczne</b>
Rodzaje MES	Akustyka ciała stałego i wody; obliczenia nieustalone z krokiem mikro / nanosekundowym
Wymagania CPU/RAM; trudności	Ekstremalne; objętości modelu rzędu 1000 m <sup>3</sup> , pożądana wielkość elementu 1 cm <sup>3</sup> lub mniej, precyzja silnie spada wraz ze wzrostem częstotliwości; 100 kHz zupełnie nieosiągalne
Korzyści z modelowania	Wyznaczenie „podpisów akustycznych” określonych formacji geologicznych
Kontekst	Poszukiwanie Ropy / gazu, zapytanie z instytutu SWRI (Texas)



Źródło: The TBIE method and its applications To borehole acoustics in rocks with parallel fractures or tilted anisotropy  
Pei-cheng Xu, Datatrends Research Corp., April 14, 2009

Rys. 6 Schemat procedury pomiarowej i przykładowe echa w sondowaniu odwiertu geologicznego

#### 4. PERSPEKTYWY

Intensywne prace w dziedzinie NDTE trwają od wielu dekad, gdyż ośrodki przemysłowe stale zainteresowane są coraz pełniejszą informacją na temat eksploatowanych konstrukcji, stalowych, ceramicznych, kompozytowych.

Pożądanym jest zwiększanie rozdzielczości pomiaru, automatyczne rozdzielanie szumów od sygnału użytecznego, osiąganie większej uniwersalności i szybkości procedury. W osiągnięciu tych ambitnych celów może istotnie pomóc prototypowanie numeryczne, a zwłaszcza Metoda Elementów Skończonych.

Słowem kluczem w dziedzinie NDTE pozostaje komplementarność. Już dziś stosowane jest z powodzeniem połączenie w danym badaniu kilku technik NDTE, z wykorzystaniem modelowania komputerowego MES do jakościowej lub ilościowej kalibracji i interpretacji wyników. Niewykluczone, że standardem staną się np. obliczenia MES in-situ, rozwiązujące zagadnienie odwrotne na bazie wykonanego na badanym obiekcie obrazowania 3D geometrii. Symulacje takie są już wprowadzane w medycynie, podczas operacji układu kostnego czy naczyniowego.

Największe obiektywne trudności związane są z połączeniem MES z technikami opartymi na propagacji fal o wysokich częstotliwościach (X, mikrofałe, ultradźwięki). Jednocześnie należy się spodziewać rozpowszechnienia algorytmów SFEM, operujących w dziedzinie częstotliwości i pokonujących problem nadmiernej liczby elementów.

MES jest i powinien być kluczowym narzędziem wszędzie tam, gdzie celem jest ilościowe szacowanie naprężeń w materiale. Należy też coraz intensywniej wykorzystywać bogate możliwości modelowania we wspieraniu różnorodnych NDTE elektromagnetycznych.

## 5. BIBLIOGRAFIA

1. Finite element and boundary element analysis of bridges, roads and pavements - A bibliography (1994-1997), J.Mackerle, Finite Elements in Analysis and Design Volume: 29, Issue: 1, May 15, 1998, pp. 65-73
2. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, J.Z. Zhu
3. Current and future trends in non-destructive testing of composite materials, Xavier E. Gros, Annales de Chimie Science des Matériaux, Vol 25, Issue 7, November 2000, Pages 539-544
4. Comparison of NDT techniques on a post-tensioned beam before its autopsy, X Dérobert et al, NDT & E International, Vol 35, Issue 8, December 2002, Pages 541-548
5. A review of three magnetic NDT technologies, Z.D. Wang et al, J.Mag.Mat. 324 (2012) 382-388
6. Estimation of eddy current probability of detection (POD) using finite element method, Rajesh S.N.; Udpa L.; Udpa S.S, NDT and E International, Volume 30, Number 3, June 1997, pp. 174-174(1)
7. A system identification approach to the modelling of pulsed eddy-current systems, Martin Dadić, Darko Vasić, Vedran Bilas, NDT & E International, Volume 38, Issue 2, March 2005, Pages 107-111
8. Visualization of transient behaviour of piezoelectric ceramics by mean of finite elements method : Lancelleur, P.; Fadili, S.; de Belleval, J.F.; Mercier, N. IEEE 1989 Ultrasonics Symposium Montreal, Quebec (Canada), 3-6 Oct. 1989 Vol. 2, pp. 844-845. Edited by B.R. McAvoy. IEEE (1989)
9. A theoretical procedure for detection of simulated cracks in a pipe by the direct current-potential drop technique, Wen-Hwa Chen, Jen-Shiung Chen, Huei-Lu Fang, Nuclear Engineering and Design, Volume 216, Issues 1-3, July 2002, Pages 203-211
10. Detection of axial crack in the bend region of a pipe by high frequency electromagnetic waves International Journal of Pressure Vessels and Piping Volume: 86, Issue: 11, November, 2009, pp. 764-768, Abbasi, Kavoo; Motlagh, Nasrin Hosseini; Neamatollahi, Mohammad Reza
11. A far-field airborne radar NDT technique for detecting debonding in GFRP-retrofitted concrete structures; Yu, Tzu-Yang; Büyükoztürk, Oral, NDT and E International Volume: 41, Issue: 1, January, 2008, pp. 10-24
12. Analiza namagnesowania w badaniach technicznych, materiałów ferromagnetycznych, M. Augustyniak, praca doktorska, Gdańsk 2007
13. 2D finite element method study of the stimulation induction heating in synchronic thermography NDT, Madani Louaayoua, Nasreddine Naït-Saïdb, Fatima Zohra Louaib, NDT & E International, Volume 41, Issue 8, December 2008, Pages 577-581
14. Finite element studies of the impact-echo response of plates containing thin layers and voids, Yiching Lin, Mary Sansalone, Nicholas J. Carino, Journal of Nondestructive Evaluation, March 1990, Volume 9, Issue 1, pp 27-47
15. Simulation and analysis of vibration signals generated by rolling element bearing with defects Zeki Kiral, Hira Karagülle, Tribology International, Volume 36, Issue 9, September 2003, Pages 667-678
16. A finite element test bed for diffraction tomography, You, Z.; Lord, W., Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Brunswick, Maine (United States), 23-28 Jul. 1989. Vol. 9A, pp. 447-454
17. Expert system to automate the finite element analysis for non-destructive testing, K.M Abd El-Ghany et al, NDT & E International, Vol. 33

## HISTORY AND PERSPECTIVES OF APPLYING FINITE ELEMENT METHODS IN INDUSTRIAL NONDESTRUCTIVE TESTING

**Key-words:** finite element methods, nondestructive material testing

The article summarises the variety of applications of Finite Element Methods in the field of Nondestructive Material Evaluation and Testing (NDT&E). First the NDT methods are classified with regard to the physical phenomena, resolution, quantitative / qualitative character of obtained information, and popularity in industry sectors. The Finite Element Methods are briefly described next, along with their typical applications.

Particular stress is put on the inherent limitations of FEM, e.g. difficulty of grasping multi-scale phenomena or mesh dependency on the studied frequency range. The main part of the paper describes the important role of numerical simulation as a supportive platform for industrial NDT: thermography, vibroacoustics, and electromagnetics. The presented examples are extracted from Author's projects, and show how the FEM allow better understanding of observed experimental phenomena, calibration of measuring set-ups, and finally development of novel nondestructive techniques.

