

O4/Z1/T1: Metody analizy i detekcji uszkodzeń w elementach maszyn

W roku 2007 kontynuowano badania w tematyce zastosowań fal sprężystych do detekcji i identyfikacji uszkodzeń w izotropowych oraz kompozytowych elementach konstrukcyjnych. Wykorzystując Metodę Spektralnych Elementów Skończonych wykonano liczne testy numeryczne dotyczące własności propagujących się fal wzdłużnych i poprzecznych (ścinających) w prętach, belkach, płytach, membranach oraz w powłokach z uszkodzeniami. Potwierdzono, że zjawiska odbicia i konwersji form propagującej się fali sprężystej powszechnie wykorzystywane w systemach monitorowania stanu konstrukcji są silnie uzależnione od własności mechanicznych kompozytu opisywanych objętością włókien wzmacniających i ich kątem ułożenia w kolejnych warstwach. Na drodze analizy numerycznej stwierdzono, że prędkość propagacji fali sprężystej oraz kształt jej czoła zależy od własności mechanicznych kompozytów, temperatury oraz wstępnych odkształceń i naprężeń badanego elementu konstrukcyjnego. Dogłębne poznanie i zrozumienie wpływu tych parametrów jest niezwykle ważne z punktu widzenia projektowania systemów detekcji uszkodzeń wykorzystujących zmiany w propagacji fal sprężystych. Kontynuowano również prace dotyczące poszukiwań optymalnego rozmieszczenia czujników pomiarowych w konstrukcji dla celów

O4/Z1/T1: Methods of analysis and detection of damages in machine elements

In 2007 continued have been investigations into the area of elastic waves for detection and identification of damages in isotropic and composite construction elements. Utilising the Method of Spectral Finite Elements numerous numerical tests have been executed regarding propagating properties of longitudinal and transverse (shearing) waves in rods, beams, slabs, membranes and shells with damages. It has been confirmed that the problems of deflection and conversion of forms of propagating elastic wave, which are generally used in systems of structural state monitoring, are strongly dependent on mechanical properties of the composite described by means of reinforcing fibre volume and the angle of their layout in subsequent layers. On the path of numerical analysis it has been concluded that the speed of propagation of an elastic wave and the shape of its front depends on mechanical properties of composites, temperature and initial deformations and stresses of investigated structural elements. In depth knowledge and understanding of the influence of these parameters is of significant importance from the point of view of designing systems of detection of damages utilizing the propagation of elastic waves. Continued also were activities related to the search for optimal distribution of measurement probes in the structure for the sake of damage detection. Accomplished

detekcji uszkodzeń. Przeprowadzono badania eksperymentalne kilku konfiguracji ułożenia czujników zarówno rozproszonych jak i skupionych. Stwierdzono, że obie konfiguracje pozwalają wykrywać uszkodzenia w konstrukcji bez informacji o jej stanie pierwotnym. Konfiguracja rozproszona, która w praktycznej realizacji jest znacznie droższa niż konfiguracja skupiona, charakteryzuje się brakiem tzw. martwych stref, które są charakterystyczne dla konfiguracji opartych na koncepcji układów czujników skupionych. W celu wizualizacji wyników pomiarowych opracowano i zweryfikowano metody tworzenia tzw. map uszkodzeń, które obrazują położenie oraz wielkości uszkodzeń w badanych elementach konstrukcyjnych.

W tematyce adaptacyjnej analizy dynamicznej struktur prostych i złożonych (zawierających w sobie części płytowe, powłokowe, bryłowe oraz strefy przejściowe) kontynuowano prace nad metodami, algorytmami oraz programami metody elementów skończonych (MES), które stosuje się do adaptacyjnej analizy drgań własnych. Rozpoczęto także prace nad adaptacyjną analizą drgań wymuszonych. W zakresie drgań własnych (a przy tej okazji także analizy statycznej) rozszerzono możliwości generatora siatek adaptacyjnych typu hp na przypadek wielokrotnych (iteracyjnych), trójwymiarowych podziałów typu h o całkowicie dowolnym charakterze (bez ograniczeń wynikających w możliwości generatora). W obecnej wersji podziały te wynikają jedynie z

have been experimental investigations of several configurations of sensor distribution of both distributed and lumped. It has been concluded that both configurations enable detection of damages in the structure without information about its original state. The distributed configuration, which in practical application is significantly more expensive than the lumped one, is characterized by the lack of so called dead zones, which are characteristic to configurations based on the concept of lumped sensors. In order to visualize the results of measurements developed and verified have been methods of development of so called detection maps, which reflect location and the extent of damage in investigated structural elements.

In the area of adaptive dynamical analysis of simple and complex structures (containing slab, shell and solid elements as well as transitional zones) continued were activities on the methods, algorithms and codes utilizing finite element methods (FEM), which are applicable in adaptive analysis of free vibrations. The works have commenced on the adaptive analysis of forced vibrations. In the area of free vibrations (and also at the same time of the statistical analysis) extended have been capabilities of the adaptive grid generators of the hp type on the case of multiple (iterative), three-dimensional divisions of h type with completely arbitrary character (without restriction resulting from the generators capabilities). In the present version these divisions result merely from the level of

poziomu błędów sterujących procesem adaptacji. Z kolei w zakresie drgań wymuszonych opracowano koncepcję rozwoju metod adaptacyjnych stosowanych dotychczas w przypadku zadań statyki i drgań własnych. Uwzględniono nie tylko błędy aproksymacji i modelowania, ale także błędy związane z niepewnością danych wchodzących do zadania. W przyszłym roku planowane jest zastosowanie, opracowanych dotychczas metod (oraz algorytmów) do adaptacyjnej analizy drgań wymuszonych w prostych i złożonych układach mechanicznych.

W roku sprawozdawczym kontynuowano także badania, których celem jest wykorzystanie unikalnych cech materiałów z magnetyczną pamięcią kształtu do aktywnego sterowania właściwościami mechanicznymi wybranych elementów konstrukcji. W ramach prowadzonych badań wykonano model aktywnej podpory łożyskowej, którą zamontowano na stanowisku pomiarowym. Wykonano szereg pomiarów, których celem było zbadanie wpływu aktywacji podpory na redukcję drgań wirującego wirnika. Wykazano, iż prowadzony w odpowiedni sposób proces sterowania aktywacji materiału podpory może w znacznym stopniu ograniczyć poziom drgań wirującego wirnika. Wykorzystując wyniki poprzednich badań zespołu rozpoczęto prace nad stworzeniem modelu obliczeniowego wirnika z aktywnymi podporami łożyskowymi.

errors controlling the adaptation process. On the other hand in the area of forced vibrations developed has been a concept of development of adaptive methods used up to date in case of problems in statics and free vibrations. Considered have been not only the approximation and modeling errors but also the errors related to uncertainty of data consisting in the problem. In the next year the application is planned of developed up to date methods (and algorithms) for adaptive analysis of forced vibrations in simple and complex mechanical systems.

In the reporting year continued have been investigations aimed at utilisation of unique material features with magnetic shape memory for active control of mechanical properties of selected structural elements. In the frame of conducted investigations developed has been a model of active bearing foundation, which has been fixed on the research stand. Several measurements have been accomplished aimed at investigation of the influence of the support activation on the reduction of vibrations of rotating rotor. It has been proved that the control process, carried out in a special way, of support material activation can, to a significant extent, restrict the level of vibrations of rotating rotor. Utilising the results of group's previous investigations the works have started on the development of the calculation model of the rotor with active bearing supports.

O4/Z2/T1: Podstawy mechaniki konstrukcji i materiałów

W roku sprawozdawczym kontynuowano prace dotyczące teorii powłok. Zakończono prace nad opracowaniem dynamicznie i kinematycznie ścisłej nieliniowej teorii nieregularnych powłok sprężystych, ze szczególnym uwzględnieniem sformułowania ogólnych warunków ciągłości na powierzchniowych krzywych osobliwych. Szczegółowo rozważono dwa typy powłok nieregularnych: rozwidlenie i samoprzecięcie. Dla takich powłok otrzymano wypadkowe, dwuwymiarowo ścisłe, globalne i lokalne warunki równowagi. Oryginalnymi wynikami tych prac są ścisłe, dynamiczne warunki ciągłości na krzywej osobliwej i w punktach osobliwych brzegu. Rozważono również kwazistatyczne modelowanie zagadnienia przejścia fazowego w powłoce, gdy powierzchniowa krzywa osobliwa modeluje granicę rozdziału dwóch faz materiału będących w stanie równowagi termodynamicznej. Sformułowano oryginalne dynamiczne warunki ciągłości zarówno na koherentnej jak i niekoherentnej względem obrotów krzywej rozdziału faz. Rozszerzono nieliniową teorię powłok sprężystych ze zmianą fazową materiału poprzez dodatkowe uwzględnienie energii sprężystej samej krzywej fazowej oraz dodatkowych sił i momentów działających wzdłuż samej krzywej fazowej. Wszystkie lokalne zależności dla takiego zagadnienia powłoki zostały wyprowadzone z zasady wariacyjnej stacjonarności całkowitej energii

O4/Z2/T1: Fundamentals of structural and material mechanics

In the reporting year continued have been activities related to the development of the theory of shells. Completed works on the development of a dynamically and kinematically precise non-linear theory of irregular elastic shells with a particular account of formulation of general conditions of continuity on surface singular curves. In particular two types of irregular shells have been considered, i.e. fork type and self interception. For the case of such shells obtained have been resultant, two-dimensionally precise both global and local conditions of equilibrium. The original results of these works are precise, dynamic continuity conditions on the singular curve and in singular points of the boundary. Considered also have been quasi-static modeling of phase transition in the shell when the surface singular curve models the boundary of separation of two phases of material in thermodynamical equilibrium. Formulated have been original dynamical conditions of continuity both on the coherent and non-coherent with respect to the revolutions of the phase separation curve. Extended has been the non-linear theory of elastic shells with the material phase change by additional incorporation of elastic energy of the phase curve itself as well as additional forces and moments acting along the same phase curve. All local relations for the case of such problem of the shell have been derived from

potencjalnej. Opracowano dwa oryginalne sposoby wyznaczania powierzchni środkowej cienkiej powłoki odkształconej ze znanej geometrii powierzchni nieodkształconej oraz znanych składowych tensorów odkształcenia i zginania. Wspomniane wyżej dwa sposoby to: (a) wprost ze składowych pierwszej i drugiej formy kwadratowej powierzchni odkształconej, przez analogię do metod używanych w geometrii różniczkowej powierzchni, oraz (b) przez całkowanie liniowego układu równań różniczkowych cząstkowych na gradient deformacji powłoki. Ponadto prowadzono badania w zakresie klasycznego problemu geometrii różniczkowej powierzchni. Problem ten polega na wyznaczeniu powierzchni na podstawie współczynników dwóch jej form kwadratowych. Opracowano oryginalny algorytm składający się z trzech kolejnych kroków: (1) pole rozciągnięć otrzymuje się z rozważań algebraicznych; (2) pole obrotów wyznacza się z rozwiązania układu liniowych równań różniczkowych cząstkowych 1-go rzędu; (3) wektor wodzący powierzchni otrzymuje się poprzez kwadratury. Opracowano nowy algorytm wyznaczenia położenia odkształconej powierzchni środkowej powłoki, alternatywny do już istniejących. Algorytm oparto o zmodyfikowany rozkład biegunowy gradientu deformacji powłoki. Wykazano iż warunki całkowalności układu równań dla obrotów są równoważne spełnieniu warunków ciągłości odkształceń nieliniowej teorii powłok cienkich.

the variational principle of the stationary condition of the total potential energy. Developed have been two original ways of determination of a mean surface of the thin shell deformed from the known geometry of non-deformed surface as well as known components of deformation and bending tensors. The two ways mentioned above are (a) directly from the components of first and second quadratic form of deformed surface by analogy to methods used in differential geometry and (b) by integration of a linear set of partial differential equations in the gradient of the shell deformation. The problem relies on determination of the surface on the basis of coefficients of its two quadratic forms. Developed has been an original algorithm consisting of three subsequent steps, i.e. (1) the area of stretchings is obtained from algebraic considerations, (2) the area of revolutions is determined from the solution of a linear set of partial differential equations of the 1st kind, (3) the surface's polar vector is obtained through the quadratures. Developed has been a new algorithm of determination of location of deflected mean surface of the shell, an alternative to the existing ones. The algorithm is based on a modified radial distribution of the gradient of shell deformation. It has been proved that the conditions of integration-ability of a set of equations for revolutions are equivalent to obeying the conditions of continuity of a non-linear theory of thin shells. Continued have been works related to the problems of friction. It has

Kontynuowano prace dotyczące zjawisk tarcia. Stwierdzono, że cząstki zużycia mogą przenosić obciążenia i przemieszczenia między stykającymi się powierzchniami ciał stałych. Cząstki te tworzą jednorodną i prawie ciągłą warstwę pośrednią, rozdzielającą ślizgające się powierzchnie. Warstwę cząstek zużycia opisano za pomocą ośrodka ciągłego o własnej kinematyce i równaniach konstytutywnych. W przykładach ilustracyjnych pokazano obliczone rozkłady temperatur i wielkości zużycia, na stanowisku doświadczalnym typu pin-on-disc, dla trzech różnych materiałów: stali, aluminium i cyny. Ciepło jest generowane wskutek tarcia. Prowadzono także prace dotyczące mechaniki materiałów. Zaproponowano dwuwymiarowy, nanoskalowy model przemiany martenzytycznej. W modelu wprowadzono szereg wariantów szczegółowych, które charakteryzują się jednym lub dwoma systemami ścinania i od jednej do czterech płaszczyzn niezmienniczych.

O4/Z3/T1: Teoretyczne i eksperymentalne badania oddziaływań dynamicznych w układach wirnik – łożyska

Narzędzia badawcze

W ramach środowiska programów MESWIR opracowano metodologię obliczeń obciążeń wewnętrznych i naprężeń w wałach maszyn wirnikowych łożyskowanych ślizgowo. Uwzględniono nieliniowy model filmu smarnego oraz belkowy model wirnika Bernoulliego lub Timoshenki o

been concluded that the wear particles can carry loads and displacements between contacting surfaces of solids. These particles form a homogeneous and almost continuous intermediate layer separating the sliding surfaces. The layer of wear particles has been described by means of the continuous medium with own kinematics and constitutive equations. In the illustrative examples calculated temperature distributions have been shown together with the wear extent on the research rig of the pin-on-disc type for three different materials such as steel, aluminum and zinc. The heat is generated due to friction. Works related to material mechanics have also been carried out. A two-dimensional nanoscale model has been put forward for the martensitic transformation. In the model several specific cases are introduced which can be characterized with one or two shearing systems as well as one to for invariant planes.

O4/Z3/T1: Theoretical and experimental investigations of dynamical interactions in rotor-bearings systems

Research tools

In the frame of MESWIR suite of codes developed has been a methodology for calculations of internal loads and stresses in rotating machinery shafts founded on slide bearings. Considered has been a non-linear model of lubrication film as well as a beam model of Bernoulli or Timoshenko's rotor with 4 degrees of freedom in the node.

4 stopniach swobody w węźle. Opracowano program graficzny NAPR_GRAF do analizy obliczonych naprężeń. Metodologię zastosowano w programach KINWIR-I-76 do obliczeń kinetostaticznych i NLDW-60 do symulacji stanów dynamicznych. Dzięki temu możliwa jest analiza sił tnących, momentów gnących i naprężeń w wybranych przekrojach wału. W oparciu o opracowaną metodologię, umożliwiono obliczenia pakietem MESWIR obciążeń wewnętrznych i naprężeń modelem o 6 stopniach swobody uzyskując możliwość obliczenia dodatkowo sił i naprężeń osiowych oraz skrętnych.

Przedstawiono metodologię badań w zakresie eksperymentalnej analizy modalnej konstrukcji nośnej wirnika za pomocą programu PC-CADA.

Diagnostyka symulacyjna maszyn wirnikowych

Kontynuowano prace związane z szeroko rozumianą wibracyjną diagnostyką symulacyjną maszyn wirnikowych, ze szczególnym uwzględnieniem turbozespołów 200 MW. Wykorzystując pakiet MESWIR przedstawiono prace dotyczące:

- rozosiowania łożysk,
- modelowania uszkodzeń powierzchni panwi łożyskowych (we współpracy z UWM Olsztyn).

W ramach współpracy z Universidad EAFIT, Medellin (Kolumbia) przeprowadzono szerokie konsultacje w sprawach modelowania numerycznego wirników turbin wodnych o mocy 10 kW przy pomocy pakietu MESWIR.

Developed has been a graphical procedure NAPR_GRAF for the analysis of determined stresses. Methodology has been applied to a code KINWIR-I-76 for kinetostatic calculations as well as NLDW-60 for simulation of the machine dynamical state. Due to that possible is the analysis of shearing forces, bending moments and stresses in selected cross-sections of the shaft. Basing on the developed methodology calculations are possible using the suite of codes MESWIR of internal loads and stresses using the model with 6 degrees of freedom obtaining in such way the possibility of additional calculation of forces, axial and torsional stresses.

Presented has been a methodology of investigations in the are of experimental modal analysis of the rotor's support structure using the PC-CADA code.

Simulation diagnostics of rotating machines

Continued have been activities on widely comprehended vibrational simulation diagnostics of rotating machines with a specific focus on 200 MW turbosets. With the aid of a suite of codes MESWIR the following activities have been completed:

- *bearings misalignment,*
- *modeling of surface damages of bearings bushes (in cooperation with UWM Olsztyn).*

In the frame of cooperation with Universidad EAFIT, Medellin (Columbia) carried out were extensive consultations on numerical modeling of water

Wykorzystując pakiet komercyjny ABAQUS przedstawiono prace dotyczące:

- modelowania konstrukcji podpierającej wirnik (wraz z identyfikacją eksperymentalną),
- analizy wpływu pęknięć konstrukcji podpierającej wirnik na jej stan dynamiczny.

Mikroturbiny i mikrołożyska

Nurt prac dotyczących dynamiki mikroturbin kogeneracyjnych, o mocach rzędu do ok. 20 kWe. W ramach tego nurtu wykonano:

- szereg prac koncepcyjnych i problemowych na tematy szeroko pojętej kogeneracji rozproszonej i zastosowania mikroturbin (prezentacje i artykuły prof. Kicińskiego),
- szczegółową analizę rozwiązań konstrukcyjnych mikroturbin i mikrołożysk dostępnych w literaturze i w handlu (współpraca z UWM Olsztyn),
- ocenę możliwości obliczeń łożysk wysokoobrotowych przy pomocy programów łożyskowych pakietu MESWIR.

Powyższe analizy doprowadziły do konkluzji, iż najbardziej obiecujące do zastosowania w mikroturbinach są łożyska foliowe. W nurcie prac dotyczących łożysk foliowych wykonano:

- opracowanie metodologii wyznaczenia zastępczej sztywności warstwy nośnej,

turbine rotors of 10 kW power using the MESWIR suite of codes.

Utilising the commercial software ABAQUS the following works have been accomplished:

- *modeling of the rotor supporting structure (together with experimental identification),*
- *analysis of the influence of cracks in rotor support structure on its dynamical state.*

Microturbines and microbearings

Accomplished also has been a number of works related to the dynamics of cogeneration microturbines with powers of the order of about 20 kWe. In the frame of that activity executed have been the following works:

- *a series of conceptual and fundamental works on a widely comprehended dispersed cogeneration and application of microturbines (presentations and papers by prof. Kiciński),*
- *a detailed analysis of structural designs of microturbines and microbearings available in literature and commerce (cooperation with UWM Olsztyn),*
- *assessment of possibilities of calculation of high speed bearings using the suite of codes MESWIR for bearings calculations.*

The above analysis led to conclusions that the most promising for application in microturbines are the foil bearings.

- badanie wpływu wybranych parametrów warstwy nośnej łożyska foliowego na jej charakterystyki.

Prace wykonane z zastosowaniem programu ABAQUS.

O4/Z4/T1: Analiza numeryczna wybranych zagadnień mechaniki elementów maszyn i materiałów

Celem prowadzonych badań była analiza termosprężysta turbiny parowej podczas rozruchu (z stanu zimnego z częściowym podgrzewem). Określono przemieszczenia względne oraz bezwzględne korpusu zewnętrznego i wału. Przygotowano siatki MES korpusu zewnętrznego, wewnętrznego a także obejm łopatkowych, dławnic i wału. Przeprowadzono obliczenia termosprężyste całej turbiny podczas rozruchu ze stanu zimnego z ograniczonym nagrzewem. Kolejnym zadaniem badawczym realizowanym w roku sprawozdawczym była analiza drgań wymuszonych i samowzbudnych pierwszego stopnia sprężarki silnika S03 dla prędkości obrotowych $n=15400$ obr/min. Stwierdzono, że analiza drgań swobodnych nie jest wystarczająca do oceny przydatności proponowanej metody. Konieczna zatem jest analiza drgań wymuszonych. Na podstawie przedstawionych wyników pomiaru przeprowadzono analizę drgań wymuszonych dla prędkości obrotowej silnika 15400 obr/min. W kolejnym etapie opracowano algorytm i program

In the frame of works on foil bearing the following has been accomplished:

- *development of methodology of determination of equivalent stiffness of the load layer*
- *investigations of the influence of selected parameters of the foil bearing load on its characteristics*

The works have been carried out with application of the ABAQUS code.

O4/Z4/T1: Numerical analysis of selected problems of mechanics of machine elements and materials

The objective of carried out investigations was a thermoelastic analysis of a steam turbine due to startup (from a cold state with a partial heating). Determined have been relative and absolute displacements of external casing and a shaft. Constructed have been FEM grids of the external casing, internal casing and also the bearing bushes, sealings and the shaft. The thermoelastic calculations have been executed for the entire turbine during the startup from a cold state with a restricted heating. Another research topic realised in the reporting year was the analysis of forced and self-excited vibrations of the first stage of the compressor's engine S03 for the case of rotational velocity of $n=15400$ rev/min. It has been concluded that the analysis of free vibrations is not sufficient for the assessment of applicability of proposed method.

wyznaczenia sił niestacjonarnych działających w stopniu sprężarkowym z uwzględnieniem łopatek wirnikowych i kierowniczych. Algorytm ten jest oparty na trójwymiarowych równaniach Eulera i metodzie objętości skończonych. Wykorzystując powyższy algorytm obliczono niestacjonarne siły działające na łopatki wirnikowe I stopnia sprężarki dla prędkości 15400 obr/min. Uzyskano w ten sposób również częstości wymuszające łopatkę wirnikową, które są widoczne w analizie diagnostycznej. W roku sprawozdawczym opracowano dwu i trójwymiarowy model strukturalny MES warstwy nośnej łożyska foliowego analizowanego eksperymentalnie przez Ku i Heshmata. Obliczono odkształcenia warstwy nośnej łożyska foliowego. Stwierdzono, że wyniki przemieszczeń otrzymane z modelu dwuwymiarowego i trójwymiarowego są porównywalne. Zgodność otrzymanych wyników numerycznych z wynikami eksperymentalnymi jest dobra. Różnice są spowodowane niedoskonałością modelu numerycznego, a w szczególności brakiem danych dla współczynnika tarcia.

Therefore the analysis of forced vibrations is necessary. On the basis of presented results of measurement the analysis of forced vibrations has been carried out for the rotational velocity of 15400 rev/min. In the subsequent stage the algorithm has been developed together with a code for determination of non-stationary forces acting the compressor stage with account of rotor and guide vane blades. The algorithm is based on three-dimensional Euler equations and the finite volume method. Utilising the above algorithm calculated have been non-stationary forces acting on rotor blades of the 1st stage of compressor in the case of rotational velocity of 15400 rev/min. Obtained in such way were also the forcing frequencies of the rotor blade which are perceptible in the diagnostic analysis. In the reporting year developed have been two and three-dimensional structural FEM model of the loading layer of a foil bearing, which has been experimentally analysed by Ku and Heshmata. Calculated have been deformations of a loading layer of the foil bearing. It has been concluded that the results of displacements obtained from a two-dimensional and three-dimensional models are comparable. The consistency of obtained numerical results with experimental results is satisfactory. The differences are rendered by imperfection of a numerical model and in particular due to the lack of friction factor data.

Wiesław Ostachowicz

Translated by Dariusz Mikielwicz