# SPIS TREŚCI

W skrócie	2
Nauka i Technika	
Jarosław BARTNICKI	
Owalizacja wałków drążonych w procesach walcowania poprzeczno – klinowego	
Ovalization of hollowed shafts in cross wedge rolling processes	5
Tomasz CZYSZPAK	
Przykład zastosowania wnioskowania Takagi–Sugeno w diagnostyce narzędzi skrawających	
The example of Takagi–Sugeno inference in machine tools diagnostic	9
Adam DANIELCZOK, Andrzej BIENIEK, Ireneusz HETMAŃCZYK	
Porównanie przebiegu procesu rozpędzania przy ciągłej i stopniowej zmianie przełożenia w samochodzie osobowym	
Comparison of passenger car acceleration process by stepped and continuously drive train ratio changes	13
Kazimierz DROZD	
Stanowisko do badania modeli piór resorowych	
The conception of research test stand of leaf spring models	18
Jakub GAJEWSKI, Józef JONAK	
Klasyfikacja sygnałów siły skrawania za pomocą sieci neuronowej	
The classification of cutting forces signals using neural network	24
Marcin KONDRACKI	
Problem eliminacji ołowiu z mosiądzów armaturowych	
Problem of lead elimination from fixture brasses	28
Adam KOZIEJ	
Zużycie kawitacyjne elementów układu przepływowego poziomych zespołów pompowych niskiego ciśnienia na przykładzie stacji wodociągowej	
Cavitation wear process units of a flow system of horizontal low pressure-pumps aggregates	
in a water-supply station	32
Edward LISOWSKI, Michał PANEK	
Modelowanie metodą CFD pracy łopatek w pomple łopatkowej	20
CFD modeling of varie pump varies operation	30
Paweł LONKWIC Madalawania zasnału panadawaga windu	
Modelowanie zespołu napędowego windy	10
	42
MICNAł RYCHLIK Rekonstrukcja geometrij objektów przestrzepnych przy zredukowanej ilości	
danych pomiarowych	
Geometry reconstruction of the three-dimensional objects with limited quantity	
of measurement data	45
Eksploatacja i Niezawodność nr 2/2004	1

# SPIS TREŚCI

Grzegorz SAMOŁYK Wpływ parametrów geometrycznych rowka wypływki na efektywność procesu kucia Influence of the geometric flash parameters on die forging efficiency	)
Marcin STAWARZ	
Kompleksowa ocena jakości żeliwa sferoidalnego	
Evaluation complex of quality for nodular cast iron5	5
Jerzy TURCHAN	
Wspomaganie projektowania przedkuwek	
Design process for die forging for ideal preforms	)
Mariusz WALCZAK, Jarosław BIENIAŚ	
Struktura powłok SiO <sub>2</sub> oraz SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> wytwarzanych metodą zol-żel	
Structure of SiO <sub>2</sub> and SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub> coatings produced by sol-gel method	1
Konrad J. WALUŚ	
Wyznaczanie parametrów ruchu samochodu osobowego podczas hamowania z wykorzystaniem czujników przyspieszeń	
Determination of movement parameters of a car during breaking using acceleration sensors 69	)
Mariusz WINIECKI	
Zagadnienie biomechanicznej biokompatybilności kości i materiałów konstrukcyjnych implantów ortopedycznych w świetle współczesnego dwufazowego porosprężystego modelu tkanki kostnej	
Problem of the biomechanical biocompatibility of bone and constructional materials for bone implants in the light of modern two-phase poroelastic model of bone tissue	1

### BARTNICKI J.: Owalizacja walków drążonych w procesach walcowania poprzeczno – klinowego; EiN nr 2/2004, s. 5-8.

W nowoczesnych konstrukcjach coraz szersze zastosowanie znajdują wyroby drążone. Jedną z technologii wytwarzania tego typu wyrobów może stać się walcowanie poprzeczno – klinowe (WPK). W celu poszerzenia zakresu zastosowań tej technologii kształtowania przeprowadzono jego badania numeryczne i doświadczalne z wykorzystaniem wsadów drążonych. Analizowano wpływ parametrów geometrycznych wsadu i narzędzi na stabilność procesu WPK.

### CZYSZPAK T.: Przykład zastosowania wnioskowania Takagi–Sugeno w diagnostyce narzędzi skrawających; EiN nr 2/2004, s. 9-12.

W artykule przedstawiono podstawowe założenia systemów logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno FL(TS). Następnie opisano wyniki badań systemów logiki rozmytej (systemów wnioskowania rozmytego) skonstruowanych w celu diagnozowania narzędzia skrawającego. Celem tych badań było porównanie sprawności systemów FL(TS) ze sprawnościami sieci neuronowych (FFBP) oraz systemami logiki rozmytej z wnioskowaniem Mamdani FL(MD).

#### DANIELCZOK A., BIENIEK A., HETMAŃCZYK I.: Porównanie przebiegu procesu rozpędzania przy ciąglej i stopniowej zmianie przełożenia w samochodzie osobowym; EiN nr 2/2004, s. 13-17.

W opracowaniu porównano przebieg procesu rozpędzania samochodu przy ciągłej i stopniowej zmianie przełożenia. Szczególną uwagę skupiono na dynamicznych aspektach procesu. Wykazano, że algorytm sterowania przełożeniem przekładni znacząco wpływa na czas rozpędzania i straty mocy.

### DROZD K.: Stanowisko do badania modeli piór resorowych; EiN nr 2/2004, s. 18-23.

W pracy przedstawiono koncepcję badań modeli piór resorowych na stanowisku do badań wytrzymałości zmęczeniowej próbek. Opracowano sposób badań uwzględniający kryteria podobieństwa zawarte we wstępie pracy. Przedstawiono analizę wartości i stanu naprężeń w badanych próbkach. Zamieszczono wstępne obliczenia maksymalnego blędu bezwzględnego wyznaczania naprężeń.

### GAJEWSKI J., JONAK J.: Klasyfikacja sygnałów siły skrawania za pomocą sieci neuronowej; EiN nr 2/2004, s. 24-27.

W artykule omówiono rezultaty wstępnych badań nad zastosowaniem sieci neuronowej do klasyfikacji stanu ostrza skrawającego mocowanego w głowicy wielonarzędziowej, stosowanego do urabiania skał. Badania te wydają się być niezbędne do identyfikowania procesu urabiania oraz skonstruowania adaptacyjnego systemu jego kontroli.

#### KONDRACKI M.: Problem eliminacji olowiu z mosiądzów armaturowych; EiN nr 2/2004, s. 28-31.

W artykule zaprezentowano początkowy etap badań nad wyeliminowaniem ołowiu z mosiądzów armaturowych oraz synergiczny wpływ niektórych pierwiastków na strukturę i własności tych stopów. Przedstawiono porównanie własności technologicznych mosiądzów ołowiowych oraz bezołowiowych, w których dodatek ołowiu zastąpiono przez bizmut.

#### KOZIEJ A.: Zużycie kawitacyjne elementów układu przepływowego poziomych zespołów pompowych niskiego ciśnienia na przykładzie stacji wodociągowej; EiN nr 2/2004, s. 32-35.

W pracy przedstawiono analizę procesów zużycia kawitacyjnego elementów układu przepływowego pomp wirowych jednostopniowych oraz propozycje dotyczące podwyższenia trwałości tych elementów. Analizę przeprowadzono w oparciu o dane eksploatacyjne poziomych zespołów pompowych niskiego ciśnienia pracujących na stacji wodociągowej. Artykuł zawiera także informacje na temat konstrukcji pomp wirowych jednostopniowych oraz zjawiska erozji kawitacyjnej elementów układu przepływowego pomp wirowych

### LISOWSKI E., PANEK M.: Modelowanie metodą CFD pracy lopatek wpompie lopatkowej; EiN nr 2/2004, s. 36-41.

W pracy podjęto analizę przepływu między łopatką a statorem pompy dla uzyskania korzystnych warunków pracy jakimi są: występowanie płynnego tarcia i szczelność układu. Odpowiedni docisk łopatki w połączeniu z odpowiednimi rozwiązaniem geometrii tego zespołu ma istotne znaczenie dla uzyskania wysokiej sprawności i trwałości pompy. Do tego celu niezbędnym jest określenie wzorcowej siły docisku jaką powinien realizować układ hydrauliczny. Do realizacji tego celu zastosowano metody modelowania CAD i CFD. W referacie zostaną przedstawione wyniki uzyskane w badaniach modelowych.

### LONKWIC P.: Modelowanie zespołu napędowego windy; EiN nr 2/2004, s. 42-44.

Artykuł przedstawia krótkie charakterystyki poszczególnych podzespołów takich jak: sprzęgło, przekładnia mechaniczna, hamulec wchodzących w skład typowego zespołu napędowego. Przedstawiony jest również schemat obciążenia zespołu napędowego windy oraz schematy: zastępczy idynamiczny wraz z opisującymi je zależnościami matematycznymi według zasady D'Alamberta.

### BARTNICKI J.: Ovalization of hollowed shafts in cross wedge rolling processes; EiN nr 2/2004, s. 5-8.

In this article the ovalization phenomenon of workpiece in cross-wedge rolling process for hollowed shaft is presented. The ovalization phenomenon reducing field of stability of CWR process parameters for hollowed shafts. The numerical results obtained by FEM method are confirmed by stand tests. The knowledge of these problems permits in the future to impose data for designing of CWR technology.

### CZYSZPAK T.: The example of Takagi–Sugeno inference in machine tools diagnostic; EiN nr 2/2004, s. 9-12.

The paper deals with some aspects of implementation of fuzzy logic system with Takagi – Sugeno inference FL(TS). In the first part of the paper, the basics of fuzzy logic inference are presented. Then, an example of Takagi-Sugeno inference application is depicted. The problem of cutting tool diagnostics is considered in this case. In order to generally assess the analysed fuzzy logic system, the performance comparison of Takagi-Sugeno fuzzy logic inference with Mamdani inference FL(MD) and performance of artificial neural network (FFBF) is discussed.

# DANIELCZOK A., BIENIEK A., HETMAŃCZYK I.: Comparison of passenger car acceleration process by stepped and continuously drive train ratio changes; EiN nr 2/2004, s. 13-17.

In this paper the acceleration process of passenger car with continuously an steeped transmission has been compared. The main attention focus on dynamic aspects. It has been proved that the transmission ratio control algorithm has a great influence on acceleration time and power loses.

### DROZD K.: The conception of research test stand of leaf spring models; EiN nr 2/2004, s. 18-23.

The conception of research of leaf spring models (samples), using the fatigue strength test stand, is presented in this paper. Procedure of research with geometric and strength of similarities criteria is included. Analysis of value and kind of stress in samples is shown too. There are also included preliminary calculations of max absolute error of stress evaluation.

### GAJEWSKI J., JONAK J.: The classification of cutting forces signals using neural network; EiN nr 2/2004, s. 24-27.

This paper indicates results of preliminary research on utilizing neural networks to classification excavating cutting tool's condition used in multi-tool excavating heads of mechanical coal miners. Such research is necessary to identify rock excavating process with a given head, and construct adaptation systems for control of excavating process with a head.

### KONDRACKI M.: Problem of lead elimination from fixture brasses; EiN nr 2/2004, s. 28-31.

This paper describes early stages of studies on lead elimination from fixture brasses and synergic influence of some alloy addition on properties and structure of these alloys. Author showed technological properties comparison for leaded and non-leaded brasses in which lead was replaced with bismuth.

#### KOZIEJ A.: Cavitation wear process units of a flow system of horizontal low pressure-pumps aggregates in a water-supply station; EiN nr 2/2004, s. 32-35.

The paper presents the analysis of wear cavitation process units of a flow system of rotodynamic single-stage pumps and proposals relating to the rise of durability such units. The analysis was based on the service data of horizontal low pressure pumps aggregates working to the water-supply station. The article also contains basic information on the construction of rotodyanmic single-stage pumps and cavitation erosion process units of a flow system of rotodynamic pumps.

#### LISOWSKI E., PANEK M.: CFD modeling of vane pump vanes operation; EiN nr 2/2004, s. 36-41.

The paper covers the problem of the flow between the blade and stator in order to achieve advantageous work condition, which is the presence of fluid friction and leak tightness of the system. The suitable contact force of the vane against stator, together with properly determined system geometry, has a significant influence on achieving high efficiency and life of the pump. In order to achieve this purpose it is necessary to determine the master value of the contact force that the system must generate. CAD and CFD modeling methods have been used to reach the objective. The results of model analysis will be presented in the full paper.

#### LONKWIC P.: Creation of lift machine model; EiN nr 2/2004, s. 42-44.

This article presents short characteristics of individual components as: a coupling, a gear, and a brake which are elements of a typical of drive unit. It also shows a scheme of an elevator driver unit load and the following schemes: a substitute model and a dynamical model with mathematical relations describing them according to the D'Alambert principle.

#### RYCHLIK M.: Rekonstrukcja geometrii obiektów przestrzennych przy zredukowanej ilości danych pomiarowych: EiN nr 2/2004, s. 45-49.

Budowa trójwymiarowych modeli używanych w systemach CAx, wymaga precyzyjnych danych geometrycznych. W zależności od aplikacji, konieczne jest pozyskanie (oprócz danych geometrycznych) dodatkowych danych takich jak: gęstość, tekstura powierzchni, itp. Autor prezentuje metody rekonstrukcji trójwymiarowych modeli w programach CAD i przedstawia koncepcję praktycznego zastosowania POD (Proper Orthogonal Decomposition). Trójwymiarowa rekonstrukcja POD bazuje na modach statystycznych opisujących obiekt 3D.

#### SAMOŁYK G.: Wpływ parametrów geometrycznych rowka wypływki na efektywność procesu kucia; EiN nr 2/2004, s. 50-54.

Artykuł przedstawia wyniki przeprowadzonej analizy wpływu wybranych parametrów geometrycznych rowka na wypływkę na efektywność procesu kucia w matrycach otwartych. W analizie zastosowano specjalny model procesu kucia poprzez wyciskanie, w którym powstaje czop o powierzchni swobodnej. Obliczenia numeryczne wykonano stosując autorską metodę sekwencyjnej symulacji kucia matrycowego, bazującą na metodzie linii pośliżgu i charakterystyk.

### STAWARZ M.: Kompleksowa ocena jakości żeliwa sferoidalnego; EiN nr 2/2004, s. 55-58.

W pracy przedstawiono ocenę jakości żeliwa sferoidalnego w oparciu o przeprowadzone badania kompleksowe dwóch gatunków żeliw. Przedstawiono równania regresji do oceny jakości żeliwa sferoidalnego gatunku ZsCu1. Opracowano je na podstawie charakterystycznych punktów krzywych ATD. Do opisu kształtu wydzieleń grafitu zastosowano współczynnik kształtu C.

### TURCHAN J.: Wspomaganie projektowania przedkuwek; EiN nr 2/2004, s. 59-63.

In this work is presented an own application, supporting the design process for die forging for ideal preforms. The program is using the automatic OLE interface and is an add on for commercial application "Solid Works 2000". Its usage allows less complicated and quick ideal preforms designing and at the same time maintaining very precise volume measurable characteristic. This application is particularly useful for analyzing ideal preforms with extended axis.

### WALCZAK M., BIENIAŚ J.: Struktura powłok SiO<sub>2</sub> oraz SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> wytwarzanych metodą zol-żel; EiN nr 2/2004, s. 64-68.

W pracy przedstawiono rezultaty badań powłok przejściowych krzemionkowych i krzemionkowo – tytanowych na czystym technicznie tytanie oraz jego stopie Ti6AHVELI. Powłoki SiO<sub>2</sub> i SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> były nanoszone na tytanowe podłoże metodą zol-żel. Do badania składu i morfologii warstwy ceramicznej użyto mikroskopii skaningowej i analizy chemicznej EDX. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy studiów literatury można stwierdzić, że powłoki zol-żel wykazują dobre połączenie z materiałem podłoża, są jednorodne chemicznej i charakteryzują się stosunkowo dużą chropowatością.

#### WALUŚ K. J.: Wyznaczanie parametrów ruchu samochodu osobowego podczas hamowania z wykorzystaniem czujników przyspieszeń; EiN nr 2/2004, s. 69-73.

Pomiary procesów jezdnych pojazdu, przebytej drogi, osiąganych prędkości i przyspieszeń są powszechnie stosowne do wyznaczania kierowalności i stateczności ruchu samochodu, decydujących o bezpieczeństwie pasażerów. Coraz powszechniej stosowane w pojazdach urządzenia wspomagające wyznaczają konieczność zwiększenia częstotliwości pomiarowej co ogranicza stosowalność dotychczasowych metod pomiarowych.

W artykule zaprezentowano możliwości i ograniczenia zastosowania czujników przyspieszeń ADXL 105 firmy Analog Device do pomiarów opóźnień samochodu osobowego podczas hamowania. W pracy zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych i drogowych oraz pojawiające się problemy określania prędkości i przebytej drogi przez pojazd w trakcie procesu hamowania.

#### WINIECKI M.: Zagadnienie biomechanicznej biokompatybilności kości i materiałów konstrukcyjnych implantów ortopedycznych w świetle współczesnego dwufazowego porosprężystego modelu tkanki kostnej; EiN nr 2/2004, s. 74-79.

Konstrukcję układu biomechanicznego kość-implant, np.: konstrukcję sztucznego stawu biodrowego tworzącą konstrukcję nośną organizmu charakteryzuje zespół cech materiałowych, geometrycznych i dynamicznych, dobranych ze względu na osiągnięcie założonego celu. Analiza zagadnienia zgodności strukturalno-biomechanicznej kości i biomateriału wszczepu rozpatrzona na podstawie nowego dwufazowego porosprężystego modelu tkanki kostnej może dostarczyć nowych przesłanek odnośnie zwiększenia poziomu niezawodności wszczepianych sztucznych stawów i wydłużenia okresu ich eksploatacji bez konieczności reimplantacji. Praca przedstawia istotę porosprężystego modelu tkanki kostnej oraz własne badania właściwości mechanicznych kości.

### RYCHLIK M.: Geometry reconstruction of the three-dimensional objects with limited quantity of measurement data; EiN nr 2/2004, s. 45-59.

The construction of three-dimensional models used in CAx systems, to require precision geometrical data of the real object is presented. Depending on application, it is necessary to obtain (besides geometrical dimensions) additional data such as: volume density, texture of the surface, etc. Author shows method of reconstruction 3D models in CAD software and presents conception of practicable Proper Orthogonal Decomposition (POD). The POD 3D reconstruction bases on the statistical modes which describe the 3D object.

### $SAMOŁYK \ G.: \ Influence \ of the geometric flash parameters \ on \ die \ forging \ efficiency; \ EiN \ nr \ 2/2004, \ s. \ 50-54.$

The article presents the selected results of an influence of the geometrical flash land parameters on die-closed forging efficiency. The theoretical analysis was made in the author's computer program ForgeSLF, which bases on Slip Line Field Elemental Technique (SLFET). As a tools were used the closed-dies with a flat parallel and wedged flash land. It assured extrusion process (parts with the boss) in plane strain conditions.

### STAWARZ M.: Evaluation complex of quality for nodular cast iron; EiN nr 2/2004, s. 55-58.

The paper presented equations of regression for evaluation of graphite shape in nodular cast iron. They were prepared with the use of characteristic points of TDA curves. The factor shape C was used to describe the nodular cast iron.

### TURCHAN J.: Design process for die forging for ideal preforms; EiN nr 2/2004, s. 59-63.

In this work is presented an own application, supporting the design process for die forging for ideal preforms. The program is using the automatic OLE interface and is an add on for commercial application "Solid Works 2000". Its usage allows less complicated and quick ideal preforms designing and at the same time maintaining very precise volume measurable characteristic. This application is particularly useful for analyzing ideal preforms with extended axis

### WALCZAK M., BIENIAŚ J.: Structure of SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings produced by sol-gel method; EiN nr 2/2004, s. 64-68.

Results of a study of silica and silica-titania coatings for the creation of intermediate interfaces between commercially-pure Ti or titanium alloy Ti-Al4VELI are presented. Coatings of SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> on base titanium were deposited using sol-gel method. Surface morphology and chemical compositions of the coatings were studied by using scanning electron microscopy with electron diffraction spectroscopy. It is found that: coatings obtained by the sol-gel method are compact, chemically homogeneous and relatively rough.

### WALUŚ K. J.: Determination of movement parameters of a car during breaking using acceleration sensors; $\rm EiN~nr~2/2004,\,s.~69-73.$

Measurements of driving properties of a vehicle, traveled distance, velocities and accelerations are commonly used in order to determine car's steerability and movement stability i.e. in order to determine its safety passengers. As devices used more and more commonly in cars require higher measuring frequencies the currently used measuring methods may require better alternatives.

The article presents the potential and limitations of ADXL 105 Analog Devices acceleration sensors in applications measuring deceleration of a personal car during breaking. The paper presents results of laboratory and road tests as well as problems encountered while determining vehicle's speed and distance covered during a breaking process.

#### WINIECKI M.: Problem of the biomechanical biocompatibility of bone and constructional materials for bone implants in the light of modern two-phase poroelastic model of bone tissue; EiN nr 2/2004, s. 74-79.

The construction of biomechanical system bone-implant e.g. construction of artificial hip joint, composing carrying construction of living organism, is characterized by set of material, geometrical and dynamic attributes, selected to fulfil required assumptions. The principal goal of biomechanical research of orthopaedic implants is to provide durability and stability of considered biomechanical system. Biomaterials assigned for orthopaedic implants and for bone graft substitutes have to satisfy series of requirements connected not only with biological response of living tissue. Analysis of structural-biomechanical compatibility of bone tissue and constructional materials of bone implant considered on the grounds of modern two-phase poroelastic model for bone tissue might afford additional knowledge required for increasing of reliability of discussed constructions and extension of its operating period without necessity of reimplantation. This paper presents the essence of the two-phase poroelastic model of bone illustrated with owns research of mechanical properties of bone.

# NAUKA I TECHNIKA

### Jarosław BARTNICKI

# OWALIZACJA WAŁKÓW DRĄŻONYCH W PROCESACH WALCOWANIA POPRZECZNO – KLINOWEGO

### OVALIZATION OF HOLLOWED SHAFTS IN CROSS WEDGE ROLLING PROCESSES

W celu poszerzenia zakresu zastosowań technologii walcowania poprzeczno - klinowego przeprowadzono jego badania numeryczne i doświadczalne z wykorzystaniem wsadów drążonych. Analizowano wpływ parametrów geometrycznych wsadu i narzędzi na stabilność procesu WPK. Na podstawie badań ustalono, że stabilność procesu WPK wyrobów drążonych może być naruszona w wyniku: poślizgu lub powstania nieusuwalnej owalizacji przekroju poprzecznego. Ostatnie z wymienionych wyżej zaburzeń nie występuje w typowych procesach WPK z wsadów pełnych, okrągłych. Dlatego też, zjawisko powstawania owalizacji, jak i warunki jej usuwania w trakcie procesu stanowiły przedmiot badań przedstawionych w pracy.

Słowa kluczowe: WPK, wałki drążone, MES, próby doświadczalne

In this article the ovalization phenomenon of workpiece in cross-wedge rolling process for hollowed shaft is presented. The ovalization phenomenon reducing field of stability of CWR process parameters for hollowed shafts. The numerical results obtained by FEM method are confirmed by stand tests. The knowledge of these problems permits in the future to impose data for designing of CWR technology.

Keywords: CWR, hollowed shafts, FEM, laboratory tests

#### 1. Wstęp

Zastosowanie elementów drążonych w konstrukcjach wzrasta z każdym rokiem. Dzięki wprowadzeniu nowoczesnych technik kształtowania przed elementami tego typu otwierają się nowe, niedostępne do tej pory z przyczyn technologicznych, zastosowania (głównie w przemyśle motoryzacyjnym i maszynowym). Podnoszenie standardów jakości w sposób naturalny faworyzuje technologie wytwórcze związane z obróbką plastyczną. Jednym z niezaprzeczalnych atutów tych technologii jest bardzo wysoka powtarzalność produkowanych wyrobów. Ponieważ głównym ich odbiorcą jest przemysł motoryzacyjny, to zalety zmniejszania ciężaru konstrukcji można bezpośrednio przełożyć na poprawę dynamiki pojazdów, zmniejszenie zużycia paliwa oraz co za tym idzie ograniczenie

emisji zanieczyszczeń. Dobrym przykładem może być tu wytwarzanie wałów i półosi napędowych. Jednym z ostatnich przykładów zastosowania elementów drążonych są wałki rozrządu. Takie właśnie rozwiązanie spotyka się w silnikach produkowanych w grupie General Motors lub BMW. W przemyśle lotniczym powiązania pomiędzy ciężarem części a osiągami maszyny są bardziej istotne, a przez to możliwe do uzyskania efekty ekonomiczne i ekologiczne stają się jeszcze bardziej wymierne. Ostatnie rozwiązania z zastosowaniem osiowo - symetrycznych elementów drążonych to przekładnie proste i kątowe, służące m.in. do napędu skrzydłowych klap sterujących, pomp paliwowych itp. Obecnie stosowane technologie wytwarzania wałków drążonych to m.in.: kucie na kowarkach, kucie na kuźniarkach, wyciskanie na zimno i tłoczenie hydrostatyczne [1]. Technologia

walcowania poprzeczno-klinowego (WPK) nie znalazła jeszcze szerszego zastosowania w warunkach przemysłowych. Problemami wdrożeniowymi są tu ograniczenia stabilności procesu kształtowania spowodowane przez występowanie: niekontrolowanego poślizgu czy owalizacji przekroju poprzecznego walcowanego wyrobu. O ile dwa pierwsze ograniczenia stabilności procesu WPK są typowymi również dla kształtowania tą metodą wyrobów pełnych, to owalizacja jest zjawiskiem charakterystycznym dla kształtowania wyrobów drążonych [2-5]. Owalizacją przekroju poprzecznego kształtowanego wyrobu  $\Delta$  oblicza się z zależności:

$$\Delta = d_{max} - d_n \tag{1}$$

gdzie:  $d_{max}$  – maksymalna średnica stopnia odkuwki po walcowaniu,  $d_n$  – nominalna (zakładana do uzyskania) średnica odkuwki. W niniejszym opracowaniu przeprowadza się analizę wpływu podstawowych parametrów procesu WPK wyrobów drążonych na owalizację  $\Delta$  kształtowanego wyrobu.

#### 2. Analiza numeryczna

W analizie numerycznej procesu WPK wykorzystano program MSC.SuperForm 2002, bazujący na metodzie elementów skończonych (MES). Umożliwia on modelowanie procesów kształtowania zachodzących w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia. Jeden z opracowanych modeli geometrycznych procesu WPK pokazano na rys. 1.

W skład modelu wchodzą dwa płaskie narzędzia klinowe (poruszające się w przeciwnych kierunkach, z prędkością 0,06 m/s każdy) oraz wsad modelowany za pomocą 8-węzłowych elementów prostopadłościennych. Jako wsad do procesu przyjęto rury o średnicy zewnętrznej Ø30 mm oraz średnicach wewnętrznych równych Ø9, Ø12, Ø15 i Ø18 mm i długości 180 mm wykonane z ołowiu w gatunku Pb1. W obliczeniach

numerycznych analizowano przypadek kształtowania przewężenia w środkowej części wsadów w zakresie redukcji średnicy zewnętrznej z Ø30 mm na Ø26, Ø24, Ø22 i Ø20 mm.

Przy doborze parametrów geometrycznych narzędzi (klinów) kierowano się wynikami badań jakie przedstawiono w pracach Celikova [6] i Grigoreva [7], przy uwzględnieniu własnych doświadczeń. Przyjęto wykonanie analiz numerycznych procesu WPK z wsadów drążonych w zakresie kąta kształtującego  $\alpha$ =20÷40° oraz kąta rozwarcia klina  $\beta$ =6÷10°. Celem analiz numerycznych było m.in. zbadanie zjawiska owalizacji przekroju poprzecznego kształtowanego wsadu oraz ustalenie zakresu stabilności procesu WPK wyrobów drążonych w aspekcie dokładności wymiarowej wyrobu finalnego.

Na podstawie analiz numerycznych ustalono, że we wszystkich rozpatrywanych przypadkach kształtowany materiał ulegał owalizacji. Zjawisko to występuje już na początku fazy kształtowania wyrobu. Jest to spowodowane tym, że kształtowana na wskroś, środkowa część wsadu ma możliwość swobodnego płynięcia. Jednakże w części z analizowanych przypadków, powstająca na początku procesu owalizacja przekroju, była skutecznie usuwana w końcowej fazie procesu (kalibrowaniu). Z przeprowadzonych badań wynika, że skutecznemu usuwaniu owalizacji sprzyja wydłużenie strefy kalibrowania. W analizowanych wariantach, w przypadku stosowania narzędzi z mniejszymi kątami rozwarcia klina  $\beta = 6^{\circ}$  oraz  $\beta = 8^{\circ}$ , przyjęta długość strefy kalibrowania 56 mm była wystarczająca we wszystkich analizowanych przypadkach. Dla segmentów klinowych o większym kącie  $\beta$  oraz przy wsadach o mniejszych grubościach ścianki bocznej h=6 mm i h=7.5 mm przyjęta długość strefy kalibrowania narzędzi była zbyt mała dla skutecznego usunięcia owalizacji. Przykład porównawczy dla dwóch wybranych przypadków kształtowania symulowanych MES, pokazano na rys. 2.



*Rys. 1. Model geometryczny MES procesu WPK Fig. 1. FEM - numerical model of CWR process* 

### NAUKA I TECHNIKA



Rys. 2. Progresja kształtu przekroju poprzecznego kształtowanych wałków drążonych oraz rozkłady odkształceń w kolejnych fazach procesu obliczone MES

Fig. 2. Progression of shape and distribution of strain in the normal cut of hollowed shafts calculated by FEM

#### 3. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne procesu WPK z wsadów drążonych prowadzono w walcarce poprzeczno – klinowej LUW – 1. Jako wsad do procesu przyjęto próbki z ołowiu w gatunku Pb1, o wymiarach takich samych jak przyjmowano w analizie teoretycznej. Stosowano pięć zestawów narzędzi klinowych, o następujących parametrach kąta kształtującego  $\alpha$  oraz kąta rozwarcia klina  $\beta$ :

- zestaw 1:  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$ ,
- zestaw 2:  $\alpha = 30^{\circ}, \beta = 8^{\circ},$
- zestaw 3:  $\alpha = 40^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$ ,
- zestaw 4:  $\alpha = 30^{\circ}, \beta = 6^{\circ},$
- zestaw 5:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 10^\circ$

Zróżnicowanie kątów narzędzi klinowych pozwoliło m.in. na przeanalizowanie ich wpływu na powstawanie i usuwanie owalizacji przekroju poprzecznego wyrobu kształtowanego. Zastosowane w badaniach doświadczalnych narzędzia klinowe pokazano na rys. 3.

#### 4. Wyniki badań

W rezultacie badań doświadczalnych i obliczeń teoretycznych ustalono wartości owalizacji przekroju poprzecznego dla wszystkich rozpatrywanych przypadków WPK z wsadów drążonych. Wybrane wyniki, dla klinów o kącie kształtującym  $\alpha = 30^{\circ}$  podano na rys. 4. Korzystając z danych zamieszczonych na tym rysunku można prześledzić wpływ zmian wartości kąta rozwarcia klina  $\beta$ , grubości ścianki wsadu *h* 

oraz średnicy przewężenia  $d_n$  na wartość owalizacji  $\Delta$ . Najmniejsze wielkości owalizacji przekroju poprzecznego wyrobu uzyskano przy walcowaniu narzędziami zzestawu nr 2 tj.  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 8^\circ$ . Dla próbek o większej grubości ścianki wraz ze wzrostem wielkości gniotu korzystniejsze staje się zmniejszenie wartości kąta  $\beta$  (zestaw 4:  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\beta = 6^\circ$ ), a w konsekwencji wydłużenie strefy kształtowania narzędzi. W przypadku wsadów cienkościennych najlepsze efekty uzyskano przy walcowaniu na średnicę  $d_n = 24$  mm. W przypadku większych redukcji średnic powstająca na początku procesu owalizacja pozostawała nieusunięta do końca procesu WPK. Przykłady próbek, w których owalizacja została skutecznie usunięta oraz pozostała do końca procesu walcowania pokazano na rys. 5.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały występowanie owalizacji w całym zakresie parametrów kątowych narzędzi, grubości ścianek i redukcji średnic badanych próbek. Stwierdzono również, że przy odpowiednim doborze powyższych parametrów owalizacja przekroju poprzecznego wyrobu może być skutecznie zmniejszana do wartości nieistotnych z praktycznego punktu widzenia. W przypadku próbek o większej grubości ścianki oraz przy większych redukcjach średnic, korzystniejsze staje się zmniejszanie wartości kąta  $\beta$ . Minimalizuje to ryzyko wystąpienia poślizgu i zgniecenia próbki. Zbyt małe wartości kąta a utrudniają usunięcie owalizacji we wszystkich badanych przypadkach. Przy większych wartościach tego



Rys. 3. Fotografie narzędzi klinowych użytych do weryfikacji doświadczalnej Fig. 3. The wedge tools used in experimental verification

kąta, najlepiej kształtowane są próbki cienkościenne. Bardzo wąski zakres stabilności procesu WPK ze względu na występowanie owalizacji skłania do poszukiwania alternatywnych rozwiązań. Jednym znich jest walcowanie poprzecznie – klinowe realizowane za pomocą trzech narzędzi roboczych nawiniętych na walce. Drugą rozpatrywaną możliwością



Rys. 4. Wykresy zmiany wielkości owalizacji przekroju poprzecznego kształtowanego wsadu przy  $d=18, 15, 12 i 9 mm oraz \alpha = 30^{\circ}$ 

Fig. 4. Changes of ovalization of normal cut of billet in cases d = 18, 15, 12 and 9 mm at  $\alpha = 30^{\circ}$  jest kształtowanie WPK na trzpieniu, który ogranicza płynięcie materiału do środka wyrobu. Z uwagi na dużą dokładność uzyskiwanych wyników stosowanie symulacji numerycznych jest uzasadnione i pozwala na znaczne ograniczenie nakładów inwestycyjnych na etapie projektowania narzędzi i technologii WPK z wsadów drążonych.



- Rys. 5. Fotografie próbek z usuniętą w trakcie procesu owalizacją przekroju poprzecznego ( $\alpha = 30^{\circ}$ ,  $\beta = 6^{\circ}$ ,  $d_n = 20$ , d = 12) (po lewej); próbka z nieusuwalną owalizacją ( $\alpha = 20^{\circ}$ ,  $\beta = 8^{\circ}$ ,  $d_n = 20$ , d = 12) (po prawej)
- Fig. 5. Sample with ovalization removed during the process ( $\alpha = 30^{\circ}$ ,  $\beta = 6^{\circ}$ ,  $d_n = 20$ , d = 12) (left); sample with irremovable ovalization phenomena ( $\alpha = 20^{\circ}$ ,  $\beta = 8^{\circ}$ ,  $d_n = 20$ , d = 12) (right)

### 5. Literatura

- [1] Glass R., Hahn F., Kolbe M., Meyer L.W.: Processes of partial bulk metal-forming aspects of technology and FEM simulation, J. Mat. Proc. Tech. vol. 80-81 (1998), 174-178.
- [2] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: *Wybrane zagadnienia z teorii i technologii walcowania poprzecznoklinowego*. Lublin, Wyd. LTN 2001, 1-234.
- [3] Pater Z., Weroński W., Kazanecki J, Gontarz A.: *Study of the process stability of cross wedge rolling*, Journal of Materials Processing Technology 92-93, 1999, 458-462.
- [4] Pater Z.: *Numerical simulation of the cross wedge rolling process including upsetting*, Journal of Materials Processing Technology 92-93, 1999, 468-473.
- [5] Pater Z., Bartnicki J.: *Numerical simulation of tubes forming in cross-wedge rolling process*, Materiały konf. "Прогрессивные Технологии Поперечно Клиновой Прокатки", 4-6.06.2002 Mińsk (Białoruś), s. 37-41.
- [6] Celikov A. I.: Cross wedge rolling in metalworking. Ed. Mašinostroenie, Moskva (1982) (in Russian).
- [7] Grigorev A. K et al.: Changes of wall thickness in cross wedge rolling. Izv. VUZ Černaja Metalurgija no 7 (1975), 99-102 (in Russian).

### Mgr inż. Jarosław BARTNICKI

Politechnika Lubelska Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin e-mail: jarekbartek@yahoo.com

## PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA WNIOSKOWANIA TAKAGI–SUGENO W DIAGNOSTYCE NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH

### THE EXAMPLE OF TAKAGI–SUGENO INFERENCE IN MACHINE TOOLS DIAGNOSTIC

W artykule przedstawiono podstawowe założenia systemów logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno FL $\langle TS \rangle$ . Następnie opisano wyniki badań systemów logiki rozmytej (systemów wnioskowania rozmytego) skonstruowanych w celu diagnozowania narzędzia skrawającego. Celem tych badań było porównanie sprawności systemów FL $\langle TS \rangle$  ze sprawnościami sieci neuronowych (FFBP) oraz systemami logiki rozmytej z wnioskowaniem Mamdani FL $\langle MD \rangle$ .

Słowa kluczowe: logika rozmyta, diagnostyka, obrabiarki

The paper deals with some aspects of implementation of fuzzy logic system with Takagi – Sugeno inference  $FL\langle TS \rangle$ . In the first part of the paper, the basics of fuzzy logic inference are presented. Then, an example of Takagi-Sugeno inference application is depicted. The problem of cutting tool diagnostics is considered in this case. In order to generally assess the analysed fuzzy logic system, the performance comparison of Takagi-Sugeno fuzzy logic inference with Mamdani inference  $FL\langle MD \rangle$  and performance of artificial neural network (FFBF) is discussed.

Keywords: fuzzy logic, diagnostics, machine tool

#### 1 Wstęp

Postęp w automatyzacji procesów technologicznych a tym samym ograniczenie nadzoru operatora powoduje, że niezbędne staje się wyposażanie maszyn oraz centrów obróbkowych w układy diagnozujące. Układy diagnozujące narzędzie i proces skrawaniem (DNiPS) umożliwia między innymi poprawę dokładności wymiarowo kształtowej przedmiotu obrabianego. Na poprawność działania układów DNiPS wpływa wykorzystanie czujników przystosowanych do pracy w warunkach przemysłowych, rozwój metod przetwarzania danych oraz rozwój technik wspomagania wnioskowania. Jednym ze sposobów wspomagania wnioskowania jest zastosowanie systemów logiki rozmytej (systemów FL). Systemy te mogą być konstruowane jako systemy o strukturze Mamdaniego [3] oraz Takagi - Sugeno [3]. W artykule skoncentrowano się na systemach FL o strukturze Takagi - Sugeno. Wysokie sprawności tych systemów w zadaniach testowych [2] spowodowały, że postanowiono sprawdzić jak systemy FL(TS) będą klasyfikować stan zużycia wiertła. Badania przeprowadzono na wiertarce wielowrzecionowej (10 wrzecion) do obróbki korpusów silników samochodowych [4]. Stanowisko do badań pokazano na Rys. 1, natomiast konfigurację torów pomiarowych oraz parametry obróbki w [4]. Przetwarzanie wstępne oraz ekstrakcję cech każdego z zarejestrowanych sygnałów pomiarowych przeprowadzono w analogiczny sposób. W pierwszym kroku wybrano podrealizacje (części) zarejestrowanych sygnałów odpowiadających zasadniczej fazie wiercenia, tj. odrzucono części odpowiadające wejściu wiertła w materiał obrabiany oraz wycofaniu wiertła. W kolejnym kroku dokonano ekstrakcji 4 cech każdej z podrealizacji (wartość średnia; odchylenie standardowe; współczynnik kierunkowy trendu liniowego; odchylenie standardowe podrealizacji sygnału z usuniętym trendem liniowym).

W rezultacie przeprowadzonej ekstrakcji każdy z pomiarów był reprezentowany przez 24 cechy sygnałów pomiarowych oraz posuw (f) i gatunek materiału (M). W ramach badań przeprowadzono 160 pomiarów. Pomiary przeprowadzono w 2 seriach (powtórzeniach) stanowiących podstawę utworzenia zbioru uczącego i zbioru testującego [4].

Ze wszystkich dostępnych danych (26 danych) wybrano wejścia o największej istotności według metod opisanych w [4]. W artykule skoncentrowano się jedynie na wejściach wyselekcjonowanych z zastosowaniem metody pruningu wag [4].

Zastosowane systemy FL mają za zadanie klasyfikować stan wiertła do jednego z trzech poziomów zużycia narzędzia, tj. narzędzie dobre, częściowo



*Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego Fig. 1. Schematics of the measuring set - up* 

zużyte oraz zużyte. Jeśli wartość wyjścia z systemu jest mniejsza od 0.3 przyjmuje się że wiertło jest dobre, jeśli wartość wyjścia mieści się w granicach 0.3÷0.7 narzędzie uważa się za częściowo zużyte, wiertło uważa się za zużyte jeśli wartość wyjścia jest większa od 0.7.

#### 2. System logiki rozmytej o strukturze Takagi – Sugeno

System FL(TS) posiada warstwę wejściową i warstwę wejściowych funkcji przynależności oraz warstwę reguł analogiczną jak w klasycznym systemie logiki rozmytej (wnioskowanie Mamdani) [3]. Zasadnicza różnica widoczna jest w warstwie wyjściowych funkcji przynależności oraz w warstwie wyjściowej. W bazie reguł w konkluzjach stosowana jest zależność funkcyjna (1), co powoduje, że w strukturze Takagi-Sugeno nie występują jawnie wyjściowe funkcje przynależności oraz wyostrzanie.

Jeżeli 
$$x_1$$
 jest  $T_{x_1}^{\ l}$  i  $x_2$  jest  $T_{x_2}^{\ 2}$  i ..... to  
 $z=\mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, ....)$  (1)

Najczęściej zależność funkcyjna ma postać funkcji liniowej zgodnie z (2).

Jeżeli 
$$x_1$$
 jest  $T_{x_1}^{\ l}$  i  $x_2$  jest  $T_{x_2}^{\ 2}$  i ..... to  
 $z = \mathbf{a}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_2 \mathbf{x}_2 + \dots + \mathbf{b}$  (2)

Funkcje wyższych rzędów nie wpływają w istotny sposób na dokładność obliczeń, a powodują jedynie utrudnienia w konstruowaniu systemu ze względu na zwiększenie liczby wyznaczanych współczynników  $a_i$ . W szczególnym przypadku kiedy współczynniki  $a_1=a_2=...=0$ , konkluzja reguły przyjmuje wartość stałą b. W celu obliczenia wartości wyjściowej z systemu należy w pierwszym kroku wyznaczyć stopień aktywności reguł  $\alpha_i$ . Wyjście z systemu Takagi–Sugeno jest znormalizowaną sumą ważoną wyrażoną zależnością



(3) lub stosując znormalizowany stopień aktywności reguły, wyjście opisuje zależność (4).

$$y = \frac{\sum_{i=l}^{N} \alpha_i z_i}{\sum_{i=l}^{N} \alpha_i} \quad \text{oraz} \quad z_i = \sum_{k=l}^{K} a_k^i x_k + b \quad (3)$$

gdzie: N, K – odpowiednio, liczba reguł i liczba wejść do systemu; i – indeks reguły;

$$y = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i z_i \quad \text{oraz} \quad \alpha_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^{N} \alpha_i} \quad (4)$$

#### 3. Testy systemów logiki rozmytej o strukturze Takagi-Sugeno

Systemy logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno konstruowano w programie Matlab [1]. W tym pakiecie dostępny jest interfejs graficzny, który umożliwia konstruowanie systemów na dwa sposoby. Pierwszy sposób FL(TS) polega na konstruowaniu systemu z kompletna bazą reguł. Liczba reguł jest zależna od liczby arbitralnie przypisanych funkcji przynależności do wejść. Drugi sposób FL(TS-G) wykorzystuje metodę wstępnego grupowania danych wejściowych (subclustering) umożliwiającą określenie liczby funkcji przynależności przypisanych do wejść. System FL(TS-G) wyznacza minimalną liczbę reguł.

Sprawność systemu jest głównym kryterium porównania systemów. Sprawność wyznaczono zgodnie z zależnością (5).

$$\eta = \frac{(L - L_B)}{L} \cdot 100\% \tag{5}$$

gdzie: L – liczba wektorów testujących,  $L_B$  – liczba błędnie sklasyfikowanych wektorów testujących.

Testowano systemy o liczbie wejść 4, 5, 6 oraz 7. Trening systemu kończono, gdy błąd treningu nie ulegał zmniejszeniu w kilkunastu kolejnych iteracjach. Błąd treningu jest to odchylenie standardowe różnicy wartości wzorcowej oraz wyjściowej z systemu. Grupowanie danych dokonano ze standardowymi, programowymi ustawieniami parametrów określających otoczenie środka grupy [1]. Porównano sprawność systemów FL(TS), FL(TS-G) ze sprawnościami systemów FL(MD-WTA) [4], FL(MD-AG) [4], oraz sieci neuronowej FFBP dla każdej analizowanej liczby wejść (rys. 3).

Dla każdej liczby wejść w systemach FL(TS) analizowano jak na sprawność klasyfikacji wpływa warunek zakończenia treningu (rys. 4a). W pierwszym kroku trenowano system przez 1 iterację i sprawdzano sprawność systemu. W kolejnych krokach zmniejsza-



Rys. 3. Porównanie sprawności systemów Fig. 3. Comparative of performance systems



*Rys. 4. Sprawności systemów z 7 wejściami a)*  $FL\langle TS \rangle b$ )  $FL\langle TS-G \rangle$ *Fig. 4. Performance of the system with 7 inputs a)*  $FL\langle TS \rangle b$ )  $FL\langle TS-G \rangle$ 

no założony błąd treningu i ponownie sprawdzano sprawność. Zmniejszanie błędu kontynuowano do momentu aż błąd treningu nie ulegał zmniejszeniu. Dla systemu  $FL\langle TS-G \rangle$  sprawdzono jak na sprawność klasyfikacji wpływa zmiana parametru zasięg wpływu (range of influence) (rys. 4b). Jak widać z rys. 4 warunek zakończenia treningu jak również parametry grupowania danych w istotny sposób wpływają na sprawność systemów.

### 4. Podsumowanie

Systemy logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno, dla kompletnych baz reguł bardzo dobrze klasyfikuje wektory trenujące (100% sprawności podczas treningu). Zwiększanie liczby funkcji przynależności przypisanych do wejść zwiększa znacząco liczbę reguł i nie prowadzi do zwiększenia sprawności. Podczas konstruowania systemu logiki rozmytej z wnioskowaniem Takagi – Sugeno FL(TS) system obliczał relatywnie dużo parametrów w stosunku do liczby wektorów trenujących, dlatego wyniki z przeprowadzonych prób mogą być jedynie wstępem do kolejnych badań. Bardzo duża liczba reguł wynika

z faktu, że nie dokonywano łączenia reguł oraz usuwania reguł, które nie były reprezentowane przez żaden z wektorów trenujących. Podejście z zastosowaniem wstępnego grupowania danych, umożliwia przyśpieszenie wnioskowania rozmytego oraz znacząco zmniejsza liczby reguł. Warunek zakończenia treningu oraz dobór współczynników grupowania danych jest dość problematyczny, dlatego uzasadnione wydaje się stosowanie trzech zbiorów danych: trenujących, weryfikujących oraz testujących. Na podstawie zbioru weryfikującego można wyznaczyć optymalne parametry niezbędne podczas treningu. Zaleta wnioskowania opartego na logice rozmytej jest wyrazistość i czytelność reguł. Baza reguł może być uzupełniana oraz modyfikowana przez operatora. Wiedza zapisana w bazie reguł może być w bardzo łatwy sposób odzyskiwana w postaci zrozumiałej dla człowieka postaci.

### 5. Literatura

- [1] Fuzzy Logic Toolbox for Use with Matlab-User's Guide, The MathWorks, 2002.
- [2] Czyszpak T.: Praca dyplomowa magisterska: *Analiza systemów logiki rozmytej stosowanych w diagnostyce obrabiarki i procesu skrawaniem*, Politechnika Śląska w Gliwicach, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice 2003.
- [3] Sokołowski A., Czyszpak T.: *Systemy logiki rozmytej struktura i konstruowanie*. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn nr 1/2003, Gliwice 2003.
- [4] Sokołowski A.: *Wybrane zagadnienia projektowania układów diagnostycznych obrabiarki i procesu skrawania*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Mechanika, z. 142/1575, Gliwice 2003.

### Mgr inż. Tomasz CZYSZPAK

Politechnika Śląska Katedra Budowy Maszyn ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice e-mail: czyszpak@kbm.mt.polsl.gliwice.pl

### PORÓWNANIE PRZEBIEGU PROCESU ROZPĘDZANIA PRZY CIĄGŁEJ I STOPNIOWEJ ZMIANIE PRZEŁOŻENIA W SAMOCHODZIE OSOBOWYM

## COMPARISON OF PASSENGER CAR ACCELERATION PROCESS BY STEPPED AND CONTINUOUSLY DRIVE TRAIN RATIO CHANGES

W opracowaniu porównano przebieg procesu rozpędzania samochodu przy ciągłej i stopniowej zmianie przełożenia. Szczególną uwagę skupiono na dynamicznych aspektach procesu. Wykazano, że algorytm sterowania przełożeniem przekładni znacząco wpływa na czas rozpędzania i straty mocy.

Słowa kluczowe: profil prędkości, wskaźnik mocy, przekładnia bezstopniowa

In this paper the acceleration process of passenger car with continuously an steeped transmission has been compared. The main attention focus on dynamic aspects. It has been proved that the transmission ratio control algorithm has a great influence on acceleration time and power loses.

Keywords: velocity profile, power index, continuously variable transmission

#### 1. Wprowadzenie

Obserwowany wzrost liczby samochodów wyposażonych w przekładnie o przełożeniu zmiennym w sposób ciągły [2], [3], skłania do szczegółowej analizy własności ruchowych jakie wykazuje samochód przy takiej koncepcji układu przeniesienia napędu. W opracowaniu uwagę skupiono na procesie rozpędzania samochodu, porównując jego przebieg przy ciągłej i stopniowej zmianie przełożenia w układzie przeniesienia napędu.

#### 2. Analiza teoretyczna

Przebieg procesu rozpędzania samochodu istotnie zależy od zapasu siły napędowej na kołach jezdnych

$$F_z = F_n - F_{tp} \tag{1}$$

gdzie:  $F_n$  – siła napędowa,  $F_z$  – zapas siły napędowej,  $F_m$  – siła oporu powietrza i toczenia.

Tak zdefiniowany zapas siły napędowej jest wykorzystywany do przyspieszania mas w ruchu postępowym jak i obrotowym. Można zatem zapisać

$$F_z = m \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{1}{r_d} \sum_n I_k \cdot \varepsilon_k + \frac{i_c}{r_d} \cdot I_s \cdot \varepsilon_s \quad (2)$$

gdzie: m – masa samochodu,  $I_k$  – moment bezwładności koła jezdnego, n – liczba kół jezdnych,  $r_d$  – promień dynamiczny koła,  $\varepsilon_k$  – przyspieszenie kątowe koła jezdnego,  $I_s$  – moment bezwładności silnika,  $\varepsilon_s$  – przyspieszenie kątowe silnika,  $i_c$  – przełożenie całkowite układu przeniesienia napędu.

W przypadku przekładni stopniowej (i<sub>c</sub>=const dla danego biegu), można zapisać

$$\varepsilon_{k} = \frac{d\omega_{k}}{dt} = \frac{d(\frac{v}{r_{d}})}{dt} = \frac{1}{r_{d}} \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$\varepsilon_{s} = \frac{d\omega_{s}}{dt} = \frac{d(i_{c} \cdot \omega_{k})}{dt} = \frac{i_{c}}{r_{d}} \cdot \frac{dv}{dt}$$
(3)

Stąd

$$F_{z} = \frac{dv}{dt} \left( m + \frac{l}{r_{d}^{2}} \sum I_{k} + \frac{i_{c}^{2}}{r_{d}^{2}} \cdot I_{s} \right) = \frac{dv}{dt} \left( w_{l} + w_{2} \cdot i_{c}^{2} \right)$$
(4)

gdzie:

$$w_1 = m + \frac{1}{r_d^2} \sum I_k, w_2 = \frac{1}{r_d^2} \cdot I_s$$
 (5)

W przypadku samochodu wyposażonego w przekładnię bezstopniową i ∠const, zatem

$$\varepsilon_s = \frac{d\omega_s}{dt} = \frac{d(i_p \cdot i_g \cdot \omega_k)}{dt} = i_g \frac{di_p}{dt} \cdot \omega_k + \frac{d}{(6)}$$

 $\varepsilon_s = i_g \tau \cdot \omega_k + i_c \cdot \varepsilon_k \tag{7}$ 

gdzie:  $\tau$ - prędkość zmiany przełożenia przekładni  $(di_p/dt)$ .

Przez analogię do układu przeniesienia napędu o skokowo zmiennym przełożeniu zapas siły napędowej w przypadku ciągłej zmiany przełożenia jest równoważny

$$F_{z} = m \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{1}{r_{d}^{2}} \cdot \frac{dv}{dt} \sum_{n} I_{k} + \frac{i_{c}}{r_{d}} \cdot I_{s} \cdot (i_{g} \cdot \omega_{k} \cdot \tau + \frac{i_{c}}{r_{d}} \cdot \frac{dv}{dt})$$
(8)

Po uporządkowaniu otrzymuje się

$$F_{z} = \frac{dv}{dt} \cdot \left[ m + \frac{l}{r_{d}^{2}} \cdot \sum_{n} I_{k} + \left( \frac{\omega_{s}}{v} \right)^{2} \cdot I_{s} \right]$$
(9)

Wykorzystując zależność (1) po podstawieniu

$$F_n = \frac{N_n^k}{v} \tag{10}$$

oraz

$$N_n^k = N_e \cdot \eta_m \tag{11}$$

gdzie:  $N_{e}$  – moc efektywna

Tab. 1. Podstawowe dane samochodu doświadczalnegoTab. 1. Technical data of experimental vehicle

Lp.	Cecha	Wartość, opi
1.	Całkowita masa samochodu	1200 kg
2.	Powierzchnia czołowa	2,12 m <sup>2</sup>
3.	Typ i rodzaj silnika	ZI MPI
4.	Moc maksymalna / przy prędkości silnika	59 kW / 5000 obrmin <sup>-1</sup>
5.	Moment maksymalny / przy prędkości silnika	114 N m / 4000 obrmin <sup>-1</sup>
6.	Współczynnik kształtu nadwozia	0,32
7.	Typ i rodzaj przekładni	Fuji HyperM6
8.	Promień dynamiczny koła	0,29
9.	Rozpiętość przełożenia przekładni CV	0442-2,432
10.	Sposób sterowania przekładni	Elektroniczno-hydrauliczny
11.	Przełożenie przekładni głównej	4,647
12.	Pojemność skokowa silnik	1,242 dm <sup>3</sup>

otrzymuje się

$$N_{e} \cdot \eta_{m} - \frac{\omega_{s}^{2}}{i_{p}} \cdot I_{s} \cdot \tau = v \cdot \frac{dv}{dt} \cdot \left[m + \frac{1}{r_{d}^{2}} \cdot \sum_{n} I_{k} + \left(\frac{\omega_{s}}{v}\right)^{2} \cdot I_{s}\right] - v \cdot F_{tp}$$
(12)

Wyrażenie po lewej strone zawierające takie wielkości jak: sprawność mechaniczna układu przeniesienia napędu, przełożenie przekładni oraz prędkość zmiany tego przełożenia są trudne do określenia. Zaproponowano zatem wprowadzenie nowej wielkości

$$N^* = N_e \cdot \eta_m - \frac{{\omega_s}^2}{i_p} \cdot I_s \cdot \tau \tag{13}$$

dla której przyjęto termin "moc porównawcza". W opracowaniu zbadano przebieg zmian tego wskaźnika podczas przyspieszania samochodu przy różnych algorytmach sterowania przełożeniem przekładni.

#### 3. Obiekt i sposób prowadzenia badań

Do badań wykorzystano samochód osobowy Fiat Punto, którego podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 1.

Układ sterowania samochodu doświadczalnego umożliwia ciągłą oraz skokową zmianę przełożenia przekładni. Takie rozwiązanie pozwala na rozpędzanie samochodu w zróżnicowany sposób. Rozpędzanie przy ciągłej zmianie przełożenia badano dla trzech różnych strategii sterowania oznaczonych symbolami D, DE oraz L. Rozpędzanie realizowane przy skokowej zmianie przełożenia oznaczono symbolem S. Próby rozpędzania wykonano przy różnej początkowej wartości prędkości ruchu dla zadanego zakresu zmiany wychylenia pedału przyspieszenia.

#### 4. Wyniki badań

Przykładowe profile prędkości uzyskane podczas prób rozpędzania samochodu przedstawiono na rysunku 1. Jak widać czas rozpędzania do kontrolnej prędkości 35 m/s zawiera się w przedziale od 29 do 34 s. Warto jednak zwrócić uwagę na niewielka różnicę czasu rozpędzania przy strategii D i L wynoszącą zaledwie 1,3 s. Z załączonych wykresów wynika także, że zmiana przełożenia w sposób ciągły (rys.1c) skraca czas rozpędzania samochodu o ok. 4% w porównaniu z uzyskiwanym przy skokowej zmianie przełożenia w przekładni (rys.1d). W próbie przyspieszania (rys.2) charakteryzującej się znacznym przyrostem prędkości ruchu (ok.20 m/s), uzyskano podobne zależności. Jednak przy małym zakresie zmiany prędkości ruchu (ok.10 m/s) czas przyspieszania przy zmianie przełożenia w sposób skokowy (rys.2c) i ciągły (rys.2d) jest zbliżony.

W celu określenia wartości wskaźnika N\* przyspieszenie wzdłużne samochodu obliczono korzystając z zarejestrowanego ciągu chwilowych wartości prędkości liniowej [5]

$$\frac{dv}{dt} = \frac{2 \cdot v_{i+2} + v_{i+1} - v_{i-1} - 2 \cdot v_{i-2}}{10 \cdot \Delta t}$$
(14)

Wartość wskaźnika N\* obliczono z zależności (13) przy uwzględnieniu granicznej wartości siły napędowej na kołach. Siłę podstawowego oporu ruchu obliczono według wzoru

$$F_{tp} = m \cdot g \cdot \left( f_0 + f_1 \cdot \nu + f_2 \cdot \nu^4 \right) + c_x \cdot \frac{\rho}{r}$$
(15)

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie,  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_4$  – współczynniki oporu toczenia [4],  $c_x$  – współczynnik kształtu nadwozia,  $\rho$  - gęstość powietrza, A – powierzchnia czołowa samochodu. Przebiegi wskaźnika N\* przy różnych programach i strategiach sterowania przełożeniem dla wybranych wartości początkowej prędkości ruchu, przedstawiono na rysunku 3. W przypadku, gdy przełożenie przekładni zmienia się w sposób ciągły, wartość wskaźnika N\* początkowo rośnie niemal liniowo a po osiągnięciu pewnego pułapu, utrzymuje się na niemal stałym poziomie. Szybkość narastania wartości wskaźnika N\* zależy przy tym od programu sterowania przełożeniem. W przypadku stopniowej zmiany przełożenia (rys. 3d) zmiany wartości wskaźnika N\* cechuje charakterystyczny piłokształtny przebieg.

Zmiany wskaźnika N\* w funkcji prędkości obrotowej silnika dla rozważanych wariantów sterowania przełożeniem przekładni przedstawiono na rysunku 4.

W celu ilościowej oceny na wykresach zaznaczono również przebieg charakterystyki zewnętrznej silnika.

W przypadku ciągłej zmiany przełożenia przebieg wskaźnika N\* znacznie odbiega od charakterystyki zewnętrznej silnika (linia przerywana). Różnica pomiędzy rozpatrywanymi strategiami sterowania polega głównie na wykorzystaniu innego fragmentu charakterystyki silnika. Również przy skokowej zmianie przełożenia wskaźnik N\* istotnie odbiega od charakterystyki statycznej silnika. Charakter tych zmian jest jednak całkowicie odmienny od obserwowanego przy ciągłej zmianie przełożenia, a krótszy czas upływający do chwili osiagniecia przez silnik obrotów mocy maksymalnej przy ciągłej zmianie przełożenia sprawia, że przyspieszanie samochodu jest bardziej intensywne. Stratę mocy, rozumianą jako różnice wartości mocy silnika na charakterystyce zewnętrznej i wskaźnika N\* przedstawiono na rysunku 5. Z wykresów wynika, że algorytm sterowania przełożeniem przekładni istotnie wpływa na straty mocy napedowej.



*Rys. 1. Próba rozpędzania samochodu: a) strategia DE, b) strategia D, c) strategia L, d) strategia S Fig. 1. Acceleration test of vehicle: a) strategy DE, b)strategy D, c) strategy L, d) strategy S* 

### NAUKA I TECHNIKA



*Rys. 2. Próba przyspieszania samochodu: a) strategia DE, b) strategia D, c) strategia L, d) strategia S Fig. 2. Acceleration test of vehicle: a) strategy DE, b)strategy D, c) strategy L, d) strategy S* 



*Rys.3 Przebiegi wskaźnika N\* i przełożenia przekładni przy prędkości początkowej 13,8 ms-1: a) strategia DE, b) strategia D c) strategia L, d) strategia S* 

Fig. 3. N<sup>\*</sup> index and gear ratio for initial velocity 13,8 m s<sup>-1</sup> a) strategy DE, b) strategy D c) strategy L, d) strategy S



Rys. 4. Porównanie przebiegu wskaźnika N\* z charakterystyką zewnętrzną silnika przy prędkości początkowej 13,8 m·s<sup>-1</sup>: a) strategia DE, b) strategia D, c) strategia L, d) strategia S

*Fig. 4. Comparison* N<sup>\*</sup> *index and engine characteristic for initial velocity* 13,8 m·s<sup>-1</sup>: *a) strategy* DE, *b) strategy* D, *c) strategy* L, *d) strategy* S

### NAUKA I TECHNIKA



*Rys. 5. Strata mocy napędowej w procesie przyspieszania samochodu: a) strategia DE, b) strategia D, c) strategia L, d) strategia S* 

Fig. 5. Power loss in acceleration process: a) strategy DE, b) strategy D, c) strategyL, d) strategy S

#### 5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza procesu rozpędzania samochodu, przy różnych algorytmach sterowania przełożeniem przekładni, wskazuje na znaczący wpływ algorytmu sterowania na przebieg rozpatrywanego procesu. Dynamika jego przebiegu oraz straty mocy napędowej to podstawowe kryteria oceny. W dalszych opracowaniach przedmiotem analizy będą wskaźniki charakteryzujące komfort jazdy oraz energetyczny i ekologiczny aspekt pracy układu napędowego.

#### 6. Literatura:

- [1] Jantos J.: Zintegrowane sterowanie samochodowym, spalinowym układem napędowym o przełożeniu w sposób ciągły, Studia i Monografie, z. 141, Politechnika Opolska, 2003.
- [2] Nishigaya M., Tamura T., Yasue H., Kasuga S., Sugaya M.: Development of Toyota's new "Super CVT", SAE Paper 2001-01-0872, pp. 69..76, 2001.
- [3] Nowatschin K., Fleischamn H.: *Multitronic- das neue Automatikgetriebe von AUDI*, Automobiltechnische Zeitschrift 102, Teil 1, Nr. 7/8, ,pp. 548..553, Teil 2, Nr. 9, pp. 746..753, 2000.
- [4] Siłka W., Hetmańczyk I.: Estymacja parametrów modelu energetycznego samochodu na podstawie próby wybiegu, Teka Komisji Naukowo-Problemowej Motoryzacji, Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych, PAN, Kraków 2000, Zeszyt 21, s. 173..183.
- [5] Strzałkowski A., Śliżyński A.: *Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów*, PWN, Warszawa, 1983.

Mgr inż. Adam DANIELCZOK Mgr inż. Andrzej BIENIEK Dr inż. Ireneusz HETMAŃCZYK

Politechnika Opolska Zakład Samochodów ul. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole tel. (077) 400-62-72 e-mail: adanielczok@interia.pl, e-mail: abieniek@polo.po.opole.pl

## STANOWISKO DO BADANIA MODELI PIÓR RESOROWYCH

### THE CONCEPTION OF RESEARCH TEST STAND OF LEAF SPRING MODELS

W pracy przedstawiono koncepcję badań modeli piór resorowych na stanowisku do badań wytrzymałości zmęczeniowej próbek. Opracowano sposób badań uwzględniający kryteria podobieństwa zawarte we wstępie pracy. Przedstawiono analizę wartości i stanu naprężeń w badanych próbkach. Zamieszczono wstępne obliczenia maksymalnego błędu bezwzględnego wyznaczania naprężeń.

*Słowa kluczowe:* pióra resorowe, wytrzymałość zmęczeniowa, badania modelowe, stal resorowa (sprężynowa)

The conception of research of leaf spring models (samples), using the fatigue strength test stand, is presented in this paper. Procedure of research with geometric and strength of similarities criteria is included. Analysis of value and kind of stress in samples is shown too. There are also included preliminary calculations of max absolute error of stress evaluation.

Keywords: leaf spring, fatigue strength, model testing, spring steel

#### 1. Wprowadzenie

Badania wytrzymałości materiału na konkretny rodzaj obciążenia wykonuje się przy wywoływaniu jednorodnego stanu naprężeń. Modele konstrukcji poddaje się badaniom przy obciążeniach generujących złożony stan naprężeń. Złożony stan naprężeń występuje wtedy, gdy sił wewnętrznych nie można zredukować w rozpatrywanym przekroju wyłącznie do siły podłużnej (normalnej do przekroju), poprzecznej (stycznej do przekroju), momentu zginającego lub momentu skręcającego.

Celem pracy było opracowanie koncepcji stanowiska do badania zmęczeniowego próbek. Z zachowaniem kryteriów podobieństwa do rzeczywistych konstrukcji piór resorowych, wyznaczono równania do obliczania naprężeń nominalnych w przekroju zkarbem i określono stan naprężeń w próbkach. Do realizacji celu badań zaprojektowano stanowisko badawcze do badań modelowych, które można wstępnie scharakteryzować jako stanowisko do badań próbek ze zbliżonymi "wymuszeniami".

#### 2. Podstawowe założenia do budowy stanowiska badawczego

Kryteria podobieństwa piór i próbek oparto na następujących wartościach parametrów geometrycznych i wytrzymałościowych [1-6]:

- 1. amplituda odkształcenia resoru stanowi ok. 10-15% jego długości,
- 2. amplituda naprężeń w piórach nie przekracza wartości 500MPa,
- stosunek wymiarów szerokości pióra do jego grubości zawiera się w granicach 6-10, przyjmując wartość 10 zostają spełnione wymagania normy PN-76/H-04326,
- stosunek wymiarów promienia krzywizny pióra do jego grubości w stanie nieobciążonym ρ/h≥10, a po obciążeniu parametr ten silnie wzrasta (do nieskończoności), a niekiedy zmienia znak,
- 5. długość resoru półeliptycznego jest ok. 10-25 razy większa od jego szerokości (5-12,5 dla belki wspornikowej),
- 6. naprężenia od sił pionowych, których przyczyną są nierówności na drodze mają wartości co najmniej 2,5 razy większe niż naprężenia generowane w resorze w wyniku sił wzdłużnych,
- 7. odkształcenia trwałe powstałe w czasie eksploatacji nie powinny przekraczać ok. 5% odkształcenia całkowitego.

Główne założenia badawcze są następujące [7-10]:

 siły bezwładności (wynikające z masy próbek) są pomijalnie małe w porównaniu do innych sił,

- maksymalna prędkość ruchu elementu wymuszenia względem próbek wynosi ok. 5m/s,
- współczynnik karbu dla badanych próbek ma wartość ok. 2,
- minimalna liczba pomiarów dla każdej wartości naprężeń nominalnych powinna być nie mniejsza od 3,
- minimalna liczba punktów pomiarowych (dla różnych wartości naprężeń) powinna być nie mniejsza od 5.

W celu realizacji w/w założeń zaprojektowano stanowisko do badań wysokocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej na zginanie płaskie na zasadzie belki wspornikowej. Stanowisko umożliwia jednoczesne badanie do 6 sztuk próbek płaskich z karbem.

Wymiar karbu mierzony w płaszczyźnie przekroju poprzecznego próbki powinien wynosić 2mm. Grubość próbek, ze względu na wartości sił występujących podczas badań, ograniczono do 2mm. Szerokość próbek powinna być zgodna ze standardem określonym np. w [PN-76/H-04326], a długość 250mm (w tym część uchwytowa o długości ok. 20mm). Takie wymiary próbek zapewniają spełnienie kryteriów 3-5 przedstawionych na wstępie.

Wymuszenie zdecydowano zrealizować przy stałej amplitudzie odkształcenia. Umożliwia to wyznaczenie wykresów wytrzymałościowych zależności maksymalnych naprężeń generowanych w przekroju z karbem od liczby cykli liczonych do wystąpienia przełomu [11].

Z uwagi na duże wartości wymiarów próbek i duże odkształcenia należy sprawdzić, które składowe sił działających na próbkę należy brać pod uwagę, a które, zachowując świadomość popełnienia niewielkiego błędu można pominąć w celu uproszczenia problemu [12].

#### 3. Wyznaczenie naprężeń w przekroju z karbem

Rozpatrzono umieszczenie próbki płaskiej (belki wspornikowej) jak na rys. 1 z wymuszeniem w postaci mimośrodu obracającego się wokół osi przechodzącej przez punkt O z prędkością  $\omega$ . Początek układu współrzędnych dobrze jest umieścić w środku najmniejszego przekroju próbki z karbem. Bez udziału obciążenia zewnętrznego próbka zajmuje położenie równoległe do osi *x*.

Rys. 1 przedstawia maksymalne ugięcie próbki, kiedy strzałka ugięcia wynosi f a odpowiadający jej kąt ugięcia - v. Oddziaływanie pomiędzy mimośrodem wymuszającym a próbką zachodzi przy udziale dwóch podstawowych sił – siły normalnej do powierzchni próbki  $F_n$  i siły tarcia  $F_T$  pomiędzy przemieszczającymi się względem siebie elementami.

#### Naprężenia wywoływane przez siłę wymuszającą

Podstawową siłą wymuszającą zginanie próbki jest siła normalna do jej powierzchni  $F_n$ , którą wg rys. 1 można rozłożyć na składowe  $F_x$  i  $F_y$ . Najłatwiej przeprowadzić pomiary siły  $F_y$  wykorzystując zgodność jej kierunku z kierunkiem przyspieszenia Ziemi. Uwzględniając te siły wartość naprężeń zginających w przekroju z karbem można wyznaczyć z zależności (1). Wartość tych naprężeń jest ujemna z powodu zwrotu siły zginającej "w dół" [13].



- Rys. 1. Schemat działania wymuszenia prostej próbki (belki wspornikowej) maksymalnie odkształconej tzn. przy generowaniu nominalnych naprężeń
- Fig. 1. Simple sample (cantilever beam) deformation scheme with maximum strain i.e. at nominal tension

$$\sigma_g = \frac{F_y \cdot r + F_z \cdot \left(f - \frac{h}{2}\right)}{W_z} = \frac{6 \cdot F_y \cdot \left[r + \left(f - \frac{h}{2}\right) \cdot \tan(9)\right]}{b_k \cdot h^2} \le 0$$
(1)

 $F_x = F_y \cdot \tan(\vartheta) \tag{2}$ 

gdzie:  $\sigma_g$  - naprężenia zginające,  $F_x$  - składowa pozioma siły wymuszającej,  $F_y$  - składowa pionowa siły wymuszającej, r - ramię działania siły  $F_y$  (odległość od miejsca styku próbki z mimośrodem do karbu mierzona w kierunku równoległym do osi x),  $W_z$  - wskaźnik wytrzymałości przekroju z karbem na zginanie względem osi z (prostopadła do rys. 1 zgodnie z konwencją układu kartezjańskiego),  $b_k$ najmniejsza szerokość próbki w miejscu wykonania karbu, h - wysokość próbki, f - strzałka ugięcia próbki, v - kąt ugięcia próbki.

$$\sigma_{g\min} = \frac{6 \cdot F_{y\max} \cdot \left[ r_{\min} + \left( f_{\max} - \frac{h}{2} \right) \cdot \tan(\vartheta_{\max}) \right]}{b_k \cdot h^2} \quad (3)$$

Wartości strzałki oraz kąta ugięcia i ramienia siły są zmiennymi zależnymi od siebie. Dla konkretnych wartości siły określone są pozostałe zmienne. Z tego powodu minimalne wartości naprężeń  $\sigma_{gmin}$ można obliczyć podstawiając maksymalne wartości wszystkich parametrów oprócz promienia  $r_{min}$ , zgodnie z zależnością (3). Konsekwentnie, maksymalne wartości naprężeń  $\sigma_{gmax}$  - podstawiając pozostałe wartości parametrów.

#### 5. Udział sił tarcia w generowaniu naprężeń zginających

Przemieszczenia mimośrodu wymuszającego ugięcie względem próbki powodują powstawanie siły tarcia  $F_{T}$  która działa na próbkę jak na rys. 1. Wartość tej siły w najprostszym przypadku (prawo Coulomba-Amontonsa) można obliczyć jako iloczyn siły nacisku i współczynnika tarcia (4).

$$F_T = \mu \cdot F_n = \mu \cdot \frac{F_y}{\cos(\vartheta)} \tag{4}$$

gdzie:  $\mu$  - współczynnik tarcia.

$$M = F_{T} \cdot \cos(\vartheta) \cdot \left(f - \frac{h}{2}\right) - F_{x} \cdot \left(f - \frac{h}{2}\right) - F_{y} \cdot r - F_{T} \cdot \sin(\vartheta) \cdot r =$$
$$= F_{y} \cdot \left\{ \left(f - \frac{h}{2}\right) \cdot \left[\mu - \tan(\vartheta)\right] - r \cdot \left[l + \mu \cdot \tan(\vartheta)\right] \right\}$$
(5)

gdzie: M - moment zginający.

$$\sigma_{gT} = \frac{M}{W_{g}} = \frac{6 \cdot F_{y}}{b_{k} \cdot h^{2}} \cdot \left\{ \left( f - \frac{h}{2} \right) \cdot \left[ \mu - \tan(9) \right] - r \cdot \left[ 1 + \mu \cdot \tan(9) \right] \right\}$$
(6)

gdzie:  $\sigma_{gT}$  - naprężenia uwzględniające wpływ sił tarcia.

Uwzględniając siłę tarcia, oraz stosując konsekwentnie konwencję znaków, wartość momentu zginającego można obliczyć z zależności (5), a wartość naprężeń zginających - wg zależności (6). Należy zwrócić uwagę, że w przypadku zaproponowanego wymuszenia występują dwa rodzaje tarcia. Tarcie statyczne zachodzi w miejscach, gdzie prędkość ruchu względnego mimośrodu i próbki jest zerowa. Współczynnik tarcia statycznego, przy styku sprężystym i bez stosowania smarowania, może mieć wartości przewyższające 0,15. Zasadne wydaje się zastosowanie smarowania. W drugim przypadku współpracy występuje tarcie kinetyczne z niewielkimi prędkościami względnymi. Wtedy wartość współczynnika tarcia, przy zastosowaniu smarowania, nie powinna przekraczać 0,05-0,10 [14]. Naprężenia nominalne będą generowane przy maksymalnej prędkości mimośrodu względem próbki 5,1m/s.

Porównanie wartości naprężeń obliczonych zuwzględnieniem sił tarcia zamieszczono w tabeli 1. Dla najmniejszych wymuszeń wartości naprężeń wyliczonych przy użyciu zależności (1) i (6) różnią się o 0,26%. Znaczne różnice względne występują przy większych ugięciach i mogą osiągać 37%.

Tab. 1. Porównanie wartości naprężeń:  $\sigma_{g}$  obliczonych wg zależności (1) i  $\sigma_{gT}$  - wg zależności (6) dla skrajnych wartości pozostałych parametrów

Tab. 1. The comparison of stresses value:  $\sigma_g$  calculated according to equation (1) with  $\sigma_{gY}$ -according to equation (6) for extremely value of the rest parameters

Wart.	Siła $F_{y}$ [N]	Ramię siły <i>r</i> [mm]	Kąt ugięcia v [rad]	Strzałka ugięcia <i>f</i> [mm]	Współczynnik tarcia μ [-]	Wartość naprężeń <u><math>\sigma_g</math> [<i>M</i>Pa]</u>	Wartość naprężeń $\sigma_{gT}$ [ <i>MPa</i> ]	Różnica $(\sigma_{gT} - \sigma_{g})/\sigma_{g}$ [MPa]
min	15	140	0,14	20	0,05	-1300	-1785	0,26
max	100	215	0,70	85	0,10	-272	-273	37

Z wartości strzałki ugięcia, zawartej w tabeli 1 wynika, że nie zostanie spełnione kryterium podobieństwa nr 1, gdyż ugięcie maksymalne próbek będzie stanowić ponad 36% ich długości (85/230).

Przy założeniu liniowej zmiany wartości naprężeń wraz ze zmianą ugięcia z tabeli 1 można wnioskować, że każde 20mm ugięcia powoduje zmianę wartości naprężeń  $\sigma_{gT}$  o ok. -465MPa [{-1785+273}/{(85-20)/20}]. Oznacza to, że dla naprężeń liczonych z zależności (6) zostaje spełnione, przedstawione na wstępie, kryterium podobieństwa nr 2.

# 6. Znaczenie sił rozpatrywanych w przekroju z karbem

Rozpatrując przekrój poprzeczny próbki w miejscu wykonania karbu (początek układu współrzędnych na rys. 1.) można wyróżnić siły normalne i siły styczne. Siły normalne do przekroju generują naprężenia rozciągające lub ściskające, których wartość, w funkcji siły mierzonej eksperymentalnie określa zależność (7).

$$F_r = F_T \cdot \cos(\vartheta) - F_x = F_y \cdot \left[\mu - \tan(\vartheta)\right]$$
(7)

gdzie:  $F_r$  - siła rozciągająca odniesiona do przekroju z karbem.

$$\sigma_r = \frac{F_r}{b_k \cdot h} = \frac{F_y \cdot \left[\mu - \tan(\vartheta)\right]}{b_k \cdot h}$$
(8)

gdzie:  $\sigma_r$  - naprężenia rozciągające.

Naprężenia rozciągające w przekroju z karbem można wyznaczyć z zależności (8). Analizę wartości tych naprężeń przedstawiono w tabeli 2. Pomimo uwzględnienia sił tarcia przy obliczeniach naprężeń normalnych w przekroju z karbem wartość  $\sigma_r$  jest ujemna niezależnie od wartości pozostałych parametrów. Oznacza to, że próbka jest poddawana ściskaniu. Wartości naprężeń ściskających nie przekraczają 0,12% wartości naprężeń zginających i można je pominąć. Tym samym spełnione jest kryterium nr 6 dotyczące udziału naprężeń od sił wzdłużnych.

$$T = F_{y} + F_{T} \cdot \sin(\vartheta) = F_{y} \cdot \left[1 + \mu \cdot \tan(\vartheta)\right]$$
(9)

gdzie: T - siła styczna.

$$\tau_t = \frac{T}{b_k \cdot h} = \frac{F_y}{b_k \cdot h} \cdot \left[ 1 + \mu \cdot \sin(\vartheta) \right]$$
(10)

gdzie:  $\tau_{t}$  - naprężenia styczne.

$$\frac{\sigma_{red} - \sigma_{gT}}{\sigma_{gT}} = \frac{\sqrt{\sigma_{gT}^2 + 3 \cdot \tau_t^2} - \sigma_{gT}}{\sigma_{gT}}$$
(11)

gdzie:  $\sigma_{\rm red}$  - naprężenia zredukowane w<br/>g hipotezy Hubera-Misesa.

Wartość siły stycznej, odniesionej do przekroju zkarbem, można obliczyć z zależności (9), a naprężeń ścinających – z zależności (10). Względny udział naprężeń stycznych, wg hipotezy wytrzymałościowej Hubera-Misesa, wyznaczono z zależności (11). Wartości naprężeń stycznych, zestawionych w tabeli 3, są tak małe w porównaniu z wartościami naprężeń zginających, że można je pominąć przy analizie wytrzymałości zmęczeniowej próbek.

#### 7. Niepewność wyznaczania naprężeń nominalnych w przekroju z karbem

Ostatecznie naprężenia zredukowane wg hipotezy Hubera-Misesa można obliczyć korzystając z zależności (12) i (6). Nominalne naprężenia powinny uwzględniać wpływ wszystkich sił, oddziaływania mimośrodu na próbkę, na generowanie naprężeń zginających. Osiowy wskaźnik wytrzymałości przekroju jest wyliczany na podstawie wymiarów próbki pomniejszonych o wymiary karbu.

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{gT}^2 + 3 \cdot \tau^2} = \sqrt{\sigma_{gT}^2} = \left|\sigma_{gT}\right| \qquad (12)$$

Naprężenia nominalne w przekroju z karbem są w zasadzie naprężeniami zginającymi. Można stwierdzić, że próbka jest badana przy jednorodnym stanie naprężeń zginających. Wartość momentu jest zmienna i zależna od położenia rozpatrywanego przekroju względem początku układu współrzęd-

- Tab. 2. Porównanie wartości naprężeń  $\sigma_r$  obliczonych wg zależności (8) i  $\tau_t$  obliczonych wg zależności (10) z wartości  $\sigma_{\sigma\tau}$  dla skrajnych wartości pozostałych parametrów
- Tab. 2. The comparison of stresses value:  $\sigma_r$  calculated according to equation (8) and  $\tau_r$  calculated according to equation (10) with  $\sigma_{\sigma T}$  value for extremely value of the rest parameters

Wart.	Wartość naprężeń $\sigma_{gT}$ [MPa]	Wartość naprężeń $\sigma_r$ [MPa]	Stosunek naprężeń $\sigma_{gT} / \sigma_r$ [%]	Wartość naprężeń $\tau_t$ [MPa]	Różnica względna $\frac{\sqrt{\sigma_{gT}^2 + 3 \cdot \tau_t^2} - \sigma_{gT}}{\sigma_{gT}}$ [%]
min	-1785	-2,7	0,00005	1,68	0,00013
max	-273	-0,00014	0,12	1,81	0,00658

nych. Maksymalny moment zginający występuje wprzekroju z karbem.

Wartości naprężeń nie będą mierzone bezpośrednio, lecz po wykonaniu niezbędnych pomiarów, obliczane z zależności (13), która stanowi rozwinięcie wzoru (6). Z uwagi na to, że liczba pomiarów przy każdej wartości naprężeń jest mniejsza od 6, to systematycznych błędów pomiarów nie można pominąć podczas wykonywania rachunku błędów. Błędy systematyczne mogą mieć wartości porównywalne z wartościami przypadkowych błędów pomiarów. W takim przypadku należy obliczyć maksymalny błąd bezwzględny badanej wielkości [15].

$$\sigma_{red} = \left| \frac{6 \cdot m \cdot g}{b_k \cdot h^2} \cdot \left\{ \left( f - \frac{h}{2} \right) \cdot \left[ \mu - \tan(\vartheta) \right] - r \cdot \left[ 1 + \mu \cdot \tan(\vartheta) \right] \right\}$$
(13)

gdzie: *m* - masa obciążająca, *g* - przyspieszenie Ziemi.

$$\Delta \sigma_{gT} = |\partial_m (\sigma_{gT}) \Delta m + |\partial_r (\sigma_{gT}) \Delta r + |\partial_{b_k} (\sigma_{gT}) \Delta b + |\partial_h (\sigma_{gT}) \Delta h + |\partial_f (\sigma_{gT}) \Delta f + |\partial_{\phi} (\sigma_{gT}) \Delta b$$
(14)

gdzie:  $\Delta \sigma_{gT}$  - maksymalny błąd bezwzględny,  $\Delta m$ ,  $\Delta r$ ,  $\Delta b_k$ ,  $\Delta h$ ,  $\Delta v$ ,  $\Delta f$  - dokładności pomiarów eksperymentalnych poszczególnych wielkości,

 $\hat{\sigma}_m \left( \mathbf{f}_{gT} \right) = \frac{\partial \sigma_{gT}}{\partial m} - \text{pochodna cząstkowa.}$ 

Maksymalny błąd bezwzględny wyznaczania naprężeń nominalnych wyliczony z zależności (14) wynosi 57,0MPa. Stanowi to 3,41% wartości naprężeń wyliczonych ze wzoru (13). Dokładności pomiarów poszczególnych wielkości i wartości maksymalnego błędu względnego zestawiono w tabeli 3.

#### 8. Podsumowanie i wnioski

Wykonanie stanowiska i prowadzenie pomiarów według przedstawionych założeń jest poprawne. Przedstawiony sposób badań spełnia, wymienione na wstępie, kryteria podobieństwa piór resorowych i próbek od nr 2 do 6. Kryterium nr 1 nie może być spełnione ze względu na przyspieszony charakter badań. Weryfikacji kryterium nr 7 należy dokonać podczas badań, a jego spełnienie będzie zależało od właściwości wytrzymałościowych próbek.

Zależność (6) do obliczania nominalnych naprężeń uwzględnia wpływ wszystkich sił, działających pomiędzy mimośrodem wymuszającym a próbką, na generowanie naprężeń zginających. W szczególności należy badać siłę oddziaływania mimośrodu na próbkę  $F_n$  lub wykonać pośrednie jej badanie (siłę  $F_y$ ), wyznaczać siłę tarcia  $F_z$  oraz wymiary liniowe tj. ramię r działania siły  $F_y$ , strzałkę ugięcia próbki f i kąt ugięcia próbki v lub odpowiadający mu kąt obrotu mimośrodu.

Można uznać, że w próbce uzyskuje się jednorodny stan naprężeń zginających, przy czym w przekroju z karbem występuje maksymalna wartość momentu zginającego.

Przy większych odkształceniach wykonanie obliczeń wg zależności (1), czyli pominięcie w rozważaniach wpływu sił tarcia na generowanie naprężeń zginających, może prowadzić do błędów osiągających 37%. Odpowiednią zależnością do wyznaczania naprężeń nominalnych w próbkach jest wzór (13).

Wartości maksymalnego błędu względnego, obliczone z założeniem realnej do osiągnięcia dokładności pomiarów, zawierają się w granicach 9,15÷57,0MPa. Stanowi to odpowiednio 3,27÷3,41% wartości naprężeń koniecznych do zastosowania w badaniach.

Tab. 3. Analiza wartości maksymalnego błędu bezwzględnego wyznaczania naprężeń nominalnych dla współczynnika tarcia μ=0,075 i przyspieszenia ziemskiego g=9,80665 m/s²

Tab. 3. Analysis of maximum absolute error value during evaluate of nominal stress for coefficient of friction  $\mu=0,075$  and gravitational acceleration g=9,80665 m/s<sup>2</sup>

Wart.	Masa	Ramię siły	Kąt ugięcia	Strzałka ugięcia	Strzałka Wartość ugięcia naprężeń		Γ	Ookładno	ści pomi	arów		Maksyr błąd t wzglę	nalny Dez- edny
1	<i>m</i> [kg]	<i>m</i> [kg] <i>r</i> [mm]	<i>v</i> [rad] <i>f</i>	$f[\text{mm}]  \sigma_{gT}[\text{MPa}]$	$\sigma_{gT}$ [MPa]	⊿m [kg]	<i>∆r</i> [mm]	$\Delta b_k$ [mm]	<i>∆h</i> [mm]	<i>∆f</i> [mm]	∆v [rad]	$\Delta \sigma_{gT}$ [MPa]	$\Delta \sigma_{\mathbf{g}^T}$ [%]
min	1,5	140	0,14	20	-1785	0.01	0.1	0.02	0.01	0.5	0.004	9,15	3,27
max	10	215	0,70	85	-273	0,01	0,1	0,02	0,01	0,5	0,004	57,0	3,41

#### 9. Literatura

- [1] Dobrovol'skij V.I., Prjachin V.V.: Ustanovka dla programnych ispytanij materialov na malociklovuju ustalost' pri čistom izgibie. Zavodskaja Laboratorija, 4/1982.
- [2] Drozd K., Weroński A.: Analiza dokładności obliczeń elementów resorów w aspekcie wpływu wymiarów iwłaściwości materiałowych. Przegląd Mechaniczny, nr 9/2002.
- [3] Branowski B.: Sprężyny metalowe. Wyd. PWN, Warszawa 1997.
- [4] Meissner M., Wanke K.: *Handbuch Federn, Berechnung und Gestaltung im Maschinen und Gerätebau.* Wyd. VEB Verlag Technik, Berlin 1988.
- [5] Romanów F., Maćkiewicz J., Papacz W.: Wstępne badania doświadczalne resorów kompozytowych. Perspektywy rozwojowe konstrukcji, technologii i eksploatacji pojazdów samochodowych i silników spalinowych "Konmot '96" Pojazdy samochodowe. Konstrukcja i badania, t. 2, Wyd. Polskie Towarzystwo Naukowe Motoryzacji i Instytut Pojazdów Samochodowych i Silników Spalinowych Politechniki Krakowskiej, Kraków 1996, s. 205.
- [6] Wieczorek M., Nowak J.: Wybrane problemy modelowania resorów piórowych. Przegląd Mechaniczny, 13/1999.
- [7] Budynas R.G.: Advanced Strength and Applied Stress Analysis. Wyd. McGraw-Hill, Boston 1999.
- [8] Gawęcki A.: Mechanika materiałów i konstrukcji prętowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [9] Severinčik N.A., Mironov Ju.V., Masnik O.T.: *Metodika opredelenija summarnych napriaženij pri ustalostnych ispytanijach c assimetričeskom ciklom nagruženija*. Zavodskaja Laboratorija, 2/1981.
- [10] Mroziński S.: Niskocyklowe zmęczenie w warunkach obciążenia osiowego i zginania. Przegląd Mechaniczny, 20/1995.
- [11] Kozak P.: *Badania wpływu obciążenia złożonego na deformacje resoru podwójnego*. XVIII Seminarium Koła Naukowego Mechaników. Wyd. WAT, Warszawa 1999.
- [12] Miannay D.P.: Fracture mechanics. Wyd. Springer, New York 1997.
- [13] Niezgodziński M.E., Niezgodziński T.: Wzory, wykresy i tablice wytrzymałościowe. Wyd. WNT, Warszawa 1999.
- [14] Borkowski W., Wieczorek M., Wysocki J., Krasoń W., Szymczyk E.: Analiza wpływu tarcia na przebieg charakterystyki sprężystej resoru podwójnego. VI Międzynarodowe Sympozjum Instytutu Pojazdów Mechanicznych WAT, Warszawa-Rynia, 1996.
- [15] Kuśmiderska B., Meldizon J., Śpiewla E. (red): *Podstawy rachunku błędów w pracowni fizycznej*. Wyd. Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1997.

\*\*\*\*\*

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 0919/T12/2002/23 finansowanego przez KBN w latach 2002÷2004. \*\*\*\*\*\*\*\*

### Mgr inż. Kazimierz DROZD

Katedra Inżynierii Materiałowej Politechniki Lubelskiej ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin tel. +48 (81) 5381215 fax +48 (81) 5381214 e-mail: K.Drozd@pollub.pl

# KLASYFIKACJA SYGNAŁÓW SIŁY SKRAWANIA ZA POMOCĄ SIECI NEURONOWEJ

## THE CLASSIFICATION OF CUTTING FORCES SIGNALS USING NEURAL NETWORK

W artykule omówiono rezultaty wstępnych badań nad zastosowaniem sieci neuronowej do klasyfikacji stanu ostrza skrawającego mocowanego w głowicy wielonarzędziowej, stosowanego do urabiania skał. Badania te wydają się być niezbędne do identyfikowania procesu urabiania oraz skonstruowania adaptacyjnego systemu jego kontroli.

Slowa kluczowe: sieci neuronowe, zużycie narzędzi, perceptron wielowarstwowy

This paper indicates results of preliminary research on utilizing neural networks to classification excavating cutting tool's condition used in multi-tool excavating heads of mechanical coal miners. Such research is necessary to identify rock excavating process with a given head, and construct adaptation systems for control of excavating process with such a head.

Keywords: neural networks, tool wear, multilayer perceptron

#### 1. Wstęp

Identyfikacja stanu ostrza skrawającego, ze szczególnym uwzględnieniem jego geometrii, jest obecnie zagadnieniem wymagającym, w kontekście sterowania procesem urabiania, wzmożonych badań. Przemysł wydobywczy stosuje do urabiania skał noże urabiające, mocowane w głowicach wielonarzędziowych kombajnów urabiających. Noże te, zuwagi na wymaganą dużą ich odporność na zużycie przy możliwie małym obciążeniu ostrza skrawającego, charakteryzuje duża różnorodność kształtów geometrycznych. W chwili obecnej nie jesteśmy w stanie, w zmiennych warunkach urabiania, dobierać na bieżąco najbardziej efektywną, w danych warunkach geologicznych, konstrukcję noża. Budowa układów sterowania kombajnami urabiającymi musi uwzględniać zależność obciążenia, a co za tym idzie również trwałości ostrza urabiającego od jego geometrii.

W przemyśle wydobywczym, z uwagi na bardzo złożony charakter skrawania (m.in. niejednorodność urabianego materiału, różnorodność głowic wielonarzędziowych), problem właściwej identyfikacji sygnałów skrawania jest szczególnie trudny. Brak jest w zasadzie "konwencjonalnych" narzędzi i procedur pozwalających na zadowalające rozwiązanie tego problemu [4].

#### 2. Badania doświadczalne

W celu stworzenia przydatnego do procesu identyfikacji narzędzia, podjęto próbę wykorzystania sieci neuronowej. Koncepcja ta wymaga jednak dość dużej ilości danych pomiarowych, które, znając pewne charakterystyczne parametry procesu obróbki, można wykorzystać w celu utworzenia odpowiednio efektywnego modelu sieci. Przedmiotem badać stanowiskowych był nóż typu Boart hwf-100s.



Rys. 1. Nóż typu Boart hwf-100s Fig. 1. Cutting tool Boart hwf-100s

Zdecydowano się pozyskać przebiegi czasowe sił skrawania tym narzędziem w dwóch stanach: przydatności do procesu skrawania oraz stępienia, uzyskanego poprzez zeszlifowanie ostrza na wysokość 2 mm, prostopadle do osi chwytu noża. Ten sposób obniżenia jakości ostrza jest adekwatny do sytuacji obserwowanych w rzeczywistości. Pomiar siły dokonany był z wykorzystaniem siłomierza tensometrycznego. Po przekształceniu do postaci cyfrowej określono średnie wartości siły: maksymalnej, średniej oraz resztkowej. Adekwatność wyników uzyskano dzięki powtarzalności pomiarów w danych warunkach.

# 3. Poszukiwanie optymalnej truktury sieci neuronowej

W celu zaprojektowania sieci neuronowej, spełniającej postawione w zagadnieniu wymagania, posłużono się pakietem STATISTICA Neural Networks [SNN]. Jako zmienne wejściowe posłużono się wspomnianymi już danymi określającymi przebieg czasowy skrawania ( $F_{cmax}, F_{csr}, F_{cmin}$ ) oraz parametrami procesu obróbki ("t" i "g") – podziałką igłębokością skrawania. Wyjściową zmienną, co wynika z celu badań, był stan ostrza zaklasyfikowany jako OSTRY lub STĘPIONY.

Dane wejściowe zostały losowo podzielone na 3 podzbiory: uczący, walidacyjny oraz testujący. Wynika to z immanentnych cech sieci neuronowych, które po wykorzystaniu zbioru uczącego, sprawdzają poprawność swojego działania używając zbioru walidacyjnego, zawierającego dane nie stosowane w procesie uczenia. Ponieważ jednak przypadki zawarte w zbiorze walidacyjnym wpływają na ostateczne parametry sieci neuronowej, do zbadania jej przydatności niezbędny jest dodatkowy zbiór testujący [1].

Zdecydowano się skorzystać z opcji automatycznego projektanta SNN [1], przy narzuceniu jednak następującego podziału przypadków: zbiór uczący 34, zbiór walidacyjny 12, zbiór testujący 13. Granice ufności stosowane przez sieć do klasyfikacji przypadku określono na poziomie 0,9 dla akceptacji oraz 0,1 odrzucenie. Poszukiwanie optymalnej struktury rozpoczęto od tzw. sieci bayesowskich, tj. PNN (probabilistyczne sieci neuronowe) oraz sieci realizujących regresję uogólnioną - GRNN (Generalized Regression Neural Network). Są one stosowane wyłacznie do zagadnień klasyfikacji. Po przeprowadzeniu analizy okazało się, iż ten typ struktury sieci neuronowej generuje, w badanym zagadnieniu, wyjątkowo niezadowalające rezultaty. Efektywność najlepszej znalezionej sieci tego typu kształtowała się na poziomie 0,3 (współczynnik poprawnych klasyfikacji). Błąd zbioru uczącego wyniósł 0,3158, natomiast zbioru walidacyjnego 0,3894. Pakiet SNN przyjmuje poszukując optymalnej sieci, iż najlepsza jest ta, której walidacja posiada najmniejszy błąd. W tym wypadku był on dość wysoki.

Oprócz niezadowalających wyników otrzymanej sieci, dodatkowo na zaprzestanie dalszych prób w kierunku tej struktury wpłynęła jej, bardzo rozbudowana, struktura. Sieć posiadała kilkadziesiąt neuronów w warstwie. Z pośród wszystkich analizowanych przypadków sieć poprawnie sklasyfikowała ponad 25 %, prawie 70 % nie zostało sklasyfikowanych, a liczba sytuacji rozpoznanych błędnie była niższa niż 5 %.

Kolejnym rodzajem sieci, który postanowiono przetestować dla analizowanych danych pomiarowych, była sieć o radialnych funkcjach bazowych. Posiada ona warstwę wejściową, jedną warstwę ukrytą z neuronami radialnymi oraz warstwę złożona z neuronów o liniowych charakterystykach (wyjściową) [1]. Próby stworzenia zadowalającej sieci o tej strukturze również zostały zakończone niepowodzeniem. Sieć o radialnych funkcjach bazowych, niezależnie od generowanego współczynnika poprawnych klasyfikacji i struktury, nie czyniła znaczących postępów podczas uczenia. Błędy zbiorów uczącego, walidacyjnego oraz testujacego nie były niższe niż 0,3, a często znacznie przekraczały tę wartość. Próby uczenia tego rodzaju sieci zalecanymi w literaturze [2] dla tej struktury metodami, nie przyniosły pozytywnych efektów, a sama sieć, na podstawie przeprowadzonych prób, należy uznać za niewiarygodną w badanym zagadnieniu.

Z pośród głównych (najpopularniejszych) rodzajów sieci, proponowanych przez pakiet SNN w opcji automatycznego projektanta, pozostały jedynie perceptrony wielowarstwowe oraz liniowy typ sieci neuronowej. Ten ostatni na podstawie doświadczeń autorzy postanowili pominąć w analizach, jako mało efektywnych dla rozważanych zagadnień. Pozostało więc wykorzystanie poszukiwania optymalnej struktury wśród perceptronów wielowarstwowych o trzech lub czterech warstwach.

Tym razem granice ufności stosowane przez sieć do klasyfikacji, polecono przyjąć automatycznie, umożliwiając w trakcie analizy dobór najkorzystniejszych wartości. Jako funkcję błędu przyjęto "sumę kwadratów" (błąd jest sumą kwadratów różnic pomiędzy wartościami zadanymi i wartościami otrzymanymi na wyjściach każdego neuronu wyjściowego). Jest to jedna z częściej, nie tylko w trakcie uczenia sieci neuronowych, stosowanych funkcji błędu. Jej wybór jest zalecany w większości problemów regresyjnych.

#### 4. Analiza przydatności sieci neuronowej do identyfikacji stanu ostrza

Po przeprowadzeniu wielu analiz zdecydowanie najlepsza dla przeprowadzonych pomiarów skrawania nożem Boart hwf-100s okazała się sieć o strukturze MLP 5:5-8-1:1.

Efektywność wybranej sieci została zaklasyfikowana jako bardzo dobra, błąd RMS (pierwiastek z błędu średniokwadratowego) wyniósł 0,1265, a pole pod krzywą ROC 0,9207.



Rys. 2. Schemat sieci typu perceptron wielowarstwowy o architekturze MLP 6-5:8:1-1

# Fig. 2. A scheme of multilayer perceptron MLP 6-5: 8:1-1

Analizę wrażliwości sieci przedstawia tabela 1 (Fcsiły skrawania; odpowiednio: -maksymalna, średnia i resztkowa). RMS jest według [1] najczęściej stosowaną miarą jakości sieci neuronowej. Jest to sumaryczny błąd popełniany przez sieć na pewnym zbiorze danych (może to być zbiór uczący, testowy lub walidacyjny), wyznaczany poprzez sumowanie kwadratów błędów indywidualnych, podzielenie uzyskanej sumy przez liczbę uwzględnionych wartości i wyznaczenie pierwiastka kwadratowego zuzyskanego ilorazu.

W tabeli 2 przedstawiono statystyki klasyfikacyjne dla badanego zagadnienia. Zilustrowano, ile z przypadków zostało zidentyfikowanych prawidłowo, jaka ich część została rozpoznana błędnie, a ile sieć nie była w stanie zaklasyfikować w ogóle. Jak widać w tabeli, przypadków nieokreślonych nie było, a złe zaklasyfikowanie stanu ostrza miało miejsce po jednym razie dla zbiorów testującego i walidacyjnego, oraz w trzech przypadkach dla zbioru uczącego.

#### 5. Próby usprawnienia sieci poprzez mniejszenie ilości danych wejściowych

Analizując wrażliwość badanej sieci łatwo zauważyć, iż zarówno w zbiorze uczącym, jak też walidacyjnym, ranga pierwszej zmiennej wejściowej, jaką jest maksymalna siła skrawania, jest najniższa. Co więcej, iloraz (wynik podzielenia pozycji "błąd" przez błąd otrzymany przy użyciu wszystkich zmiennych) tej zmiennej wejściowej znacznie odbiega od pozostałych zmiennych. Wprawdzie graniczną wartością, jeśli chodzi o przydatność danej zmiennej do uczenia sieci, jest 1 (jeżeli iloraz jest mniejszy od jeden, to usunięcie zmiennej poprawi działanie sieci), to jednak warto rozważyć możliwość usunięcia tej zmiennej z analizy przy uczeniu sieci, gdyż często zdarza się, że taki zabieg w znaczącym stopniu upraszcza, a co za tym idzie zwiększa szybkość działania sieci.

Mając na uwadze powyższe rozważania, ustalono próg wrażliwości na poziomie 2,3, co spowodowało odrzucenie wejść, które tą wrażliwość posiadały niższą. W badanej sieci była to zmienna  $F_{c max}$ .

Usunięcie najmniej przydatnej zmiennej wejściowej sieci okazało się nietrafne. Zdecydowanie wzrosły błędy RMS zbiorów danych: uczącego do poziomu 0,5611, walidacyjnego 0,4998 oraz testującego 0,4248.

	FC_MAX	FC_ŚR	FC_MIN	G	Т	Zbiór
Ranga	5	1	3	2	4	
Błąd	0,3446097	0,7159145	0,5130001	0,5377643	0,4172563	uczący
Iloraz	1,388452	2,884461	2,066907	2,166683	1,68115	
Ranga	5	1	4	3	2	
Błąd	0,24337	0,7359864	0,4191814	0,4972453	0,5091267	walidacyjny
Iloraz	2,263529	6,845244	3,898712	4,624767	4,735273	

Tab. 1. Analiza wrażliwości dla sieci MLP 6-5:8:1-1Tab. 1. Sensitivity analysis of neural network MLP 6-5:8:1-1

Tab. 2. Statystyki klasyfikacyjne dla sieci perceptronowej MLP6-5:8:1-1Tab. 2. Classification statistics for multilayer perceptron MLP6-5:8:1-1

Zbiór	uczący		wal	idacyjny	testujący		
	OSTRY	STĘPIONY	OSTRY	STĘPIONY	OSTRY	STĘPIONY	
Razem	18	16	6	6	6	7	
Poprawnie	17	14	5	6	6	6	
Błędnie	1	2	1	0	0	1	
Nieokreślone	0	0	0	0	0	0	
OSTRY	17	2	5	0	6	1	
STĘPIONY	1	14	1	6	0	6	

	FC_ŚR	FC_MIN	G	Т	Zbiór
Ranga	1	2	3	4	
Błąd	0,6666812	0,6057476	0,5426925	0,4826357	uczący
Iloraz	1,188163	1,079567	0,9671899	0,8601563	
Ranga	1	2	4	3	
Błąd	0,7532536	0,5572802	0,4486659	0,4999924	walidacyjny
Iloraz	1,506962	1,114897	0,897603	1,000287	

Tab. 3. Analiza wrażliwości dla sieci MLP 6-5:8:1-1 po odrzuceniu zmiennej  $F_{c max}$ Tab. 3. Sensitivity analysis of neural network MLP 6-5:8:1-1 excluding  $F_{c max}$ 

Tab. 4.	Statystyki klasyfikacyjne dla sieci perceptronowej MLP 6-5:8:1-1 po odrzuceniu zmiennej wejściowej F	7 c max
Tab. 4.	Classification statistics for multilayer perceptron MLP 6-5:8:1-1 excluding $F_{cmax}$	e max

Zbiór	uczący		wal	idacyjny	testujący		
	OSTRY	STĘPIONY	OSTRY	STĘPIONY	OSTRY	STĘPIONY	
Razem	18	16	6	6	6	7	
Poprawnie	8	13	3	6	4	6	
Błędnie	10	3	3	0	2	1	
Nieokreślone	0	0	0	0	0	0	
OSTRY	8	3	3	0	4	1	
STĘPIONY	10	13	3	6	2	6	

#### 6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania sugerują, iż zastosowanie sieci neuronowej do identyfikowania stanu ostrza, przy wykorzystaniu pewnych, charakterystycznych sygnałów, jest racjonalne. Monitorowanie procesu, połączone z trafnym wychwytywaniem stanów niedopuszczalnego technologicznie stępienia ostrza, pozwoliłoby na znaczne usprawnienie procesu urabiania. W odniesieniu do otrzymanych wyników trzeba stwierdzić, że zastosowana do uczenia sieci ilość pomiarów jest dalece niewystarczająca. Aby sieć osiągnęła wymagane parametry klasyfikacji, aco za tym idzie pozwoliła na bezpieczne zastosowanie w praktyce, należy przyprowadzić wiele prób i badań.

### 7. Literatura

- [1] StatSoft®: STATISTICA Neural Networks, 1998
- [2] Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000 r.
- [3] Jonak J.: Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi, Wydawnictwo Naukowe "Śląsk", Katowice 2001 r.
- [4] Jonak J.: *Identyfikacja stanu ostrza z wykorzystaniem sieci neuronowej*, IV Krajowa Konferencja MSK, Kraków 2003 r.

### Mgr inż. Jakub GAJEWSKI Dr hab. inż. Józef JONAK, prof. PL

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska tel. (81) 5381499 e-mail: j.gajewski@pollub.pl e-mail: j.jonak@pollub.pl

## PROBLEM ELIMINACJI OŁOWIU Z MOSIĄDZÓW ARMATUROWYCH

### PROBLEM OF LEAD ELIMINATION FROM FIXTURE BRASSES

W artykule zaprezentowano początkowy etap badań nad wyeliminowaniem ołowiu z mosiądzów armaturowych oraz synergiczny wpływ niektórych pierwiastków na strukturę i własności tych stopów. Przedstawiono porównanie własności technologicznych mosiądzów ołowiowych oraz bezołowiowych, w których dodatek ołowiu zastąpiono przez bizmut.

Słowa kluczowe: mosiądze bezołowiowe, stopy CuZnBi, ATD

This paper describes early stages of studies on lead elimination from fixture brasses and synergic influence of some alloy addition on properties and structure of these alloys. Author showed technological properties comparison for leaded and non-leaded brasses in which lead was replaced with bismuth.

Keywords: non leaded brasses, CuZnBi alloys, TDA

#### 1. Wprowadzenie

Głównym celem niniejszych badań jest zaprezentowanie możliwości wyeliminowania ołowiu z mosiądzów armaturowych, których skład modelowy to Cu-59Zn39Pb2. Ołów jest wprowadzany do tych stopów w celu polepszenia ich własności technologicznych, głównie skrawalności i lejności. Jednak podczas eksploatacji elementów armatury wykonanych z mosiądzów ołowiowych ołów może przenikać do wody powodując znaczne szkody w ludzkim organizmie. Toksyczność tego dodatku spowodowała tendencję do usuwania ołowiu ze stopów miedzi.

Pierwszym działaniem, jakie podjęto było zastąpienie ołowiu innym pierwiastkiem. Ze względu na zbliżone własności fizyczne wybrano do tego celu bizmut. Metal ten ma niską temperaturę topnienia, zbliżoną gęstość i jak ołów nie tworzy z miedzią żadnych faz ani roztworów. Bizmut nie jest szkodliwy dla człowieka i jest szeroko stosowany w przemyśle farmaceutycznym i kosmetyce.

#### 2. Przeprowadzone badania i wyniki

W celu porównania własności technologicznych przeprowadzono serię wytopów, których skład chemiczny podano w tabeli 1. Porównania dokonano pomiędzy typowym mosiądzem ołowiowym (około 2% Pb) i grupą mosiądzów bezołowiowych z dodatkiem bizmutu (w zakresie 1 - 3% Bi). Pozwoliło to przeanalizować własności technologiczne mosiądzów bezołowiowych w funkcji udziału dodatku bizmutu i określić jego optymalną wielkość.

W zakresie badań własności technologicznych przeprowadzono spiralną próbę lejności oraz analizę skrawalności. Spiralna próba lejności polega na odlaniu metalu do formy o kształcie spirali. Lejność ocenia się na podstawie długości odcinka spirali, który zosta-

Tab. 1.	Skład chemiczny poszczególnych wytopów (udział składników w % mas.)
Tab. 1.	Chemical composition (in % weight) of investigated alloys

nr wytopu	Cu	Bi	Pb	Zn
1	59.67	1.01	0.01	
2	5c9.23	1.61	0.03	
3	58.97	2.00	0.02	
4	60.15	3.02	0.01	reszta
5	58.90	0.00	1.90	
6	59.28	0.00	1.70	
7	59.57	0.00	1.60	

nie wypełniony metalem. Temperatura ciekłego metalu wynosiła we wszystkich próbach 1030 °C. Próby przeprowadzono w formach suszonych. Dla każdego wytopu próba lejności była powtarzana trzykrotnie, w celu zredukowania błędu pomiarowego. Uśrednione wyniki próby lejności przedstawiono w tabeli 2.

Jak widać, mosiądz ołowiowy ma wyższą lejność niż mosiądze z dodatkiem bizmutu. Lejność mosiądzów bezołowiowych początkowo spada wraz ze wzrostem ilości bizmutu (minimum lejności dla dodatku 2% Bi), a następnie nieznacznie wzrasta.

Analiza skrawalności składała się z pomiaru oporów skrawania, pomiaru chropowatości po obróbce oraz obserwacji rodzaju wiórów powstających przy obróbce. Schemat układu pomiarowego sił skrawania pokazano na rysunku 1. Rysunek 2 przedstawia część wyników pomiarów sił skrawania.

Bizmut ma silniejszy wpływ na zmniejszenie sił skrawania niż ołów. Wraz ze wzrostem udziału tego pierwiastka opory skrawania maleją. Jakość powierzchni po obróbce była bardzo zbliżona dla obu grup stopów.

Kształt wióra uzyskiwany podczas obróbki jest bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na możliwość obróbki elementów na automatach. Drobny wiór o odpowiednim kształcie zapewnia nie tylko łatwość jego usuwania, ale również bezpieczeństwo pracy narzędzia i dobrą jakość powierzchni. Długie wióry wstęgowe mogące zaplątać się w narzędzie mogą pogorszyć jakość powierzchni, a nawet doprowadzić do zniszczenia narzędzia. Dlatego wiór powinien mieć kształt łukowy segmentowy (rozdrobniony) – właśnie w celu rozdrobnienia wiórów wprowadza się ołów. Porównanie kształtu wiórów dla badanych stopów znajduje się na rysunku 3.

Jak widać z rysunku 3 zarówno ołów jak i bizmut powodują powstawanie wióra o pożądanym kształcie. W zakresie rozdrobnienia wiórów bizmut jest dodatkiem bardziej efektywnym (rysunek 3c - f) niż ołów (rysunek 3a, b). Rozdrobnienie wióra zwiększa się ze wzrostem zawartości bizmutu, co potwierdza silny wpływ bizmutu na kruchość miedzi i jej stopów [5].

W celu przebadania wpływu bizmutu na strukturę mosiądzu przeprowadzono analizę metalograficzną. Typowe obrazy mikrostruktury obu grup stopów pokazano na rysunku 4.

Ta grupa mosiądzów ma budowę dwufazową  $\alpha + \beta$ ' z wydzieleniami Pb lub Bi. Jak widać z rysunku 4 obie grupy stopów nie różnią się w sposób znaczący pod względem mikrostruktury. Stopy z dodatkiem

Tab. 2.	Uśrednione wyniki próby lejności	
Tab. 2.	Results of fluidity test	

	2% Pb	1% Bi	2% Bi	3% Bi
lejność, [m]	0.52	0.45	0.37	0.40



- Rys. 1. Układ pomiarowy sił skrawania: 1 siłomierz; 2 – uchwyt pomiarowy; 3 – uchwyt tokarski; 4 – nadajnik; 5 – łożysko wrzeciona; 6 – napęd wrzeciona; 7 – wzmacniacz; 8 – przetwornik A/C; 9 – komputer i urządzenia peryferyjne [11]
- Fig. 1. Cutting force measuring system: 1 force gauge; 2 – measure holder; 3 – three-jaw chuck; 4 – transmitter; 5 – spindle bearing; 6 – spindle drive; 7 – amplifier; 8 –A/C converter; 9 –computer and peripherals [11]



- Rys. 2. Składowa obwodowa siły skrawania dla badanych stopów przy różnych prędkościach skrawania V
- Fig. 2. Circumferential component of cutting force for various cutting speed V and brasses with different additions

bizmutu wykazały nieco wyższą zawartość fazy  $\alpha$ (o około 10%). Ponieważ konwencjonalna analiza metalograficzna nie ujawniła rozmieszczenia bizmutu w mikrostrukturze mosiądzu przeprowadzono analizę rentgenograficzną. Rysunek 5 pokazuje pole pomiarowe (rysunek 5a) oraz mapę rozmieszczenia bizmutu (rysunek 5b).

Analiza rentgenograficzna wykazała, że bizmut ulega segregacji i rozmieszczony jest głównie na granicy faz  $\alpha + \beta$ '.



- Rys. 3. Kształt wiórów dla badanych stopów, prędkość skrawania 40 m/min., a, b) CuZnPb2, c) 1%Bi, d) 1.5%Bi, e) 2%Bi, f) 3%Bi
- Fig. 3. Chip shape for investigated alloys, cutting speed 40 m/min., a, b) CuZnPb2, c) 1%Bi, d) 1.5%Bi, e) 2%Bi, f) 3%Bi



*Rys. 4. Mikrostruktura mosiądzu CuZnBi1 (a) jasna faza*  $\alpha$  *na tle ciemniejszej fazy*  $\beta$ *'i mosiądzu CuZnPb2 (b) jasna faza*  $\alpha$  *na tle ciemniejszej fazy*  $\beta$ *', czarne drobne wydzielenia Pb, forma piaskowa, traw. FeCl*<sub>3</sub>

Fig. 4. Microstructure for CuZnBi1 alloy (a) bright  $\alpha$  phase on dark  $\beta$ 'background and CuZnPb2 alloy (b) bright  $\alpha$  phase on the  $\beta$ 'background, small dark Pb inclusions, sand mould, FeCl<sub>3</sub> etched



*Rys. 5. Analiza rentgenograficzna. Pole pomiarowe (a) oraz rozmieszczenie bizmutu – jasne pola (b) Fig. 5. Roentgenographic analysis. Measuring area (a) and bismuth position – bright points (b)* 

Z przedstawionych badań oraz z bibliografii [10] można wnioskować, że bizmut nie może w pełni zastąpić ołowiu. Mosiądze bizmutowe charakteryzują się niższą lejności i odpornością na korozję. Aby poprawić wymienione własności potrzebne jest wprowadzenie dalszych dodatków. Pierwiastki, które mogłyby poprawić lejność mosiądzów to: aluminium, krzem i fosfor. Niewielkie ilości żelaza wpływają dodatnio na odporność korozyjną. Jednak dodatki te łącznie powodują powstawanie twardych wydzieleń faz pogarszających własności technologiczne (głównie zdolność do nakładania powłok). Rysunek 6 pokazuje strukturę mosiądzu ołowiowego z zaznaczonymi twardymi wydzieleniami.

Głównym źródłem powstawania twardych wydzieleń jest zanieczyszczony wsad użyty do wytopu. Zagadnienie wydzieleń jest często spotykane w praktyce odlewniczej mosiądzów ołowiowych. Temu zagadnieniu poświęcone są inne publikacje autora [6, 8].

#### 3. Wnioski

Mosiądze ołowiowe stanowią stopy o wysokich własnościach technologicznych. Uzyskuje się je przez dodatek ołowiu. Jest on odpowiedzialny za bardzo dobrą skrawalność, lejność i odporność na korozję. Jednak jego wielką wadą jest wysoka toksyczność. Z powyższych badań wynika, zagadnienie eliminacji ołowiu nie może zostać rozwiązane przez zastąpienie go tylko bizmutem. W celu zachowania wysokich własności technologicznych konieczne jest wprowadzenie innych dodatków. Ich dobór i synergiczny wpływ na własności i strukturę mosiądzów jest obecnie przedmiotem badań autora.

#### 4. Literatura

- [1] Romankiewicz F.: Modyfikacja miedzi i jej stopów, KNM PAN Poznań, Zielona Góra 1999.
- [2] Manheim R., Reif W., Weber G.: Untersuchung der Kornfeinung von Kupfer-Zinn-Legirungen mit Zirconium und/oder Eisen, sowie ihres Einflusses auf die mechanischen Eigenschaften, Giessereiforschung 40, 1988.
- [3] Kucharski M., Rzadkosz S.: Intensywność oddziaływania modyfikatorów dla mosiądzu ołowiowego MO59, X Sympozjum Naukowe z Okazji Dnia Odlewnika, ITiMO AGH,Kraków 1984.
- [4] Romankiewicz F.: Krzepnięcie miedzi i jej stopów, KNM PAN Poznań, Zielona Góra 1995.
- [5] Adamski C., Bonderek Z., Piwowarczyk T.: *Mikrostruktury odlewniczych stopów miedzi i cynku*, Śląsk, Katowice 1972.
- [6] Kondracki M., Gawroński J., Szajnar J., Grzelczak R., Podsiadło K.: *Badanie procesu krystalizacji mosiądzu ołowiowego MO59 przy pomocy ATD*, Archiwum Odlewnictwa, rocznik 2, nr 4, Katowice 2002, s.126-134.
- [7] Gawroński J., Szajnar J., Kondracki M.: Wpływ bizmutu na własności i proces krystalizacji bezołowiowych mosiądzów armaturowych, VI Konferencja Naukowo-Techniczna Odlewnictwa Metali Nieżelaznych, Zakopane 2003.
- [8] Kondracki M., Szajnar J.: *Modyfikacja mosiądzu ołowiowego MO59 modyfikatorami złożonymi*, Archiwum Odlewnictwa, rocznik 3, nr 9, Katowice 2003.
- [9] Szajnar J., Kondracki M., Stawarz M.: *Modyfikacja brązu CuSn8 i jej wpływ na segregację cyny*, Archiwum Odlewnictwa, rocznik 3, nr 10, Katowice 2003.
- [10] Janus, B. Ankudowicz : Określenie możliwości wyeliminowania ołowiu w mosiądzu CuZn39Pb2, Krzepnięcie Metali i Stopów, nr 43, Katowice 2000.
- [11] Miernik M.: Skrawalność metali, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2000.

### Mgr inż. Marcin KONDRACKI

Zakład Odlewnictwa Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechnika Śląska ul. Towarowa 7, 44 – 100 Gliwice e-mail: sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl

## ZUŻYCIE KAWITACYJNE ELEMENTÓW UKŁADU PRZEPŁYWOWEGO POZIOMYCH ZESPOŁÓW POMPOWYCH NISKIEGO CIŚNIENIA NA PRZYKŁADZIE STACJI WODOCIĄGOWEJ

# CAVITATION WEAR PROCESS UNITS OF A FLOW SYSTEM OF HORIZONTAL LOW PRESSURE-PUMPS AGGREGATES IN A WATER-SUPPLY STATION

W pracy przedstawiono analizę procesów zużycia kawitacyjnego elementów układu przepływowego pomp wirowych jednostopniowych oraz propozycje dotyczące podwyższenia trwałości tych elementów. Analizę przeprowadzono w oparciu o dane eksploatacyjne poziomych zespołów pompowych niskiego ciśnienia pracujących na stacji wodociągowej. Artykuł zawiera także informacje na temat konstrukcji pomp wirowych jednostopniowych oraz zjawiska erozji kawitacyjnej elementów układu przepływowego pomp wirowych.

Słowa kluczowe: pompy wirowe, erozja kawitacyjna, kawitacja.

The paper presents the analysis of wear cavitation process units of a flow system of rotodynamic single-stage pumps and proposals relating to the rise of durability such units. The analysis was based on the service data of horizontal low pressure pumps aggregates working to the water-supply station. The article also contains basic information on the construction of rotodynamic single-stage pumps and cavitation erosion process units of a flow system of rotodynamic pumps.

Keywords: rotodynamic pumps (centrifugal pumps), cavitation erosion, cavitation.

# 1. Budowa i zastosowanie pomp wirowych jednostopniowych poziomych typu A

Pompy są przeznaczone do przetłaczania cieczy czystych lub lekko zanieczyszczonych ciałami stałymi, wody pitnej, soków spożywczych i innych cieczy technologii spożywczych, niektórych produktów chemicznych i petrochemicznych oraz cieczy o podobnych właściwościach o temperaturze do 150°C. Typoszereg pomp A obejmuje pompy o wydajnościach od 5 do 1400 m<sup>3</sup>/h i wysokościach podnoszenia od 3 do 90 m [1,2].

Jednostopniowe poziome pompy odśrodkowe typu A, charakteryzują się prostą i zwartą budową. Pompa typu A jest wsparta na łapach, stanowiących integralną część jej spiralnego kadłuba. Poziomy króciec ssawny (włotowy) leżu w osi pompy, skierowany do góry króciec tłoczny (wylotowy) w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez oś pompy. Wirnik budowy zamkniętej ma na swej tylnej tarczy łopatki odciążające, zmniejszające siły wzdłużne oraz ciśnienie przed dławnicą. Poosiowe położenie wirnika na wale pompy ustala nakrętka wirnika zabezpieczona przed samoczynnym odkręceniem się (rys.1) [1].

#### 2. Charakterystyka warunków pracy poziomych zespołów pompowych

Pompy wirowe jednostopniowe typu 25A32 wchodzą w skład układu pomp niskiego ciśnienia . Zespoły pompowe zamontowane na stacji wodociągowej do roku 2000 wchodziły w skład 3-stanowiskowego układu pomp niskiego ciśnienia, kiedy to zespół nr 3 został zdemontowany, a jego funkcję przejęły zespoły nr 1 i nr 2, które pracują w sposób ciągły przemienny do chwili obecnej. Nominalne parame-



 Rys. 1. Pompa wirowa jednostopniowa pozioma 25A32
 Fig. 1. The rotodynamic single-stage horizontal pump, type 25A32

try pracy obecnie eksploatowanych zespołów na 1 i nr 2 wynoszą: wydajność 800 m<sup>3</sup>/h oraz ciśnienie 0,21 MPa. Zmiana parametrów pracy pompy odbywa się za pomocą zasuwy regulacyjnej zainstalowanej na rurociągu tłocznym przed zbiornikiem. Wydajność pompy ze względu na wydajności układu studni lewarowych wynosi 550 m<sup>3</sup>/h – pompa jest dławiona. Pompy pracują z napływem. Układ hydrauliczny jest odpowietrzany za pomocą układu pomp próżniowych typu PP4 pracujących w sposób ciągły przemienny. Wartość podciśnienia wytwarzanego przez pompy próżniowe waha się w granicach 80  $\div$  90 kPa.

W pierwszych latach eksploatacji nie stwierdzono większych uszkodzeń zespołów. Przy wykonywaniu przeglądów pomp dokonywano wymiany: szczeliwa dławnicy, amortyzatorów, pierścieni uszczelniających - elementów ulegających zużyciu podczas eksploatacji. Z większych awarii należy odnotować wymianę korpusu łożyskowego i łożysk w zespole nr 2 w marcu 1998 r. Niewielka awaryjność w pierwszym okresie eksploatacji wynikała głównie z mniejszego czasu pracy omawianych zespołów (względem pacy zespołu nr3) tabela 1. Sytuacja w zakresie awaryjności omawianych zespołów znacznie pogorszyła się z chwila zdemontowania w roku 2000 zespołu nr 3. Wzrosła ilość godzin pracy zespołów nr 1 i nr 2, co wpłynęło na wydłużenie czasu ich eksploatacji oraz awaryjność. W roku następnym stwierdzono awarię zespołu nr1. Zakres remontu obejmował: wymianę łożysk, wymianę pierścieni uszczelniających, szlifowanie (regenerację) tulei ochronnej wału.

- Tab. 1. Czas pracy poziomych zespołów pompowych w roku 1999
- Tab. 1. Horizontal low pressure-pump agreggates working period in year 1999

Lp.	Numer zespołu	Czas pracy
1.	Zespół nr1 25A32	33 godz.
2.	Zespół nr2 25A32	777 godz.
3.	Zespół nr3 25A32	4705 godz.

Podczas przeglądu i konserwacji zespołu pompowego nr 2, powierzchnię kanałów przepływowych wirnika wykonanego ze staliwa węglowego pompy pokryto materiałem regeneracyjnym (zabezpieczającym) kompozytowym Metal Belzona<sup>®</sup>. Celem tego zabiegu było zmniejszenie intensywności zużycia kawitacyjnego oraz erozyjnego wirnika. W następnym okresie wystąpiła awaria zespołu nr 2. Zakres remontu obejmował: wymianę wirnika pompy, wymianę łożysk, wymianę uszczelnienia, wymianę pierścieni uszczelniających.

Zastosowanie materiału regeneracyjnego (zabezpieczającego) nie przyniosło pożądanego efektu, naniesiona na powierzchnię wirnika powłoka uległa uszkodzeniu (rys.3).

### 3. Charakterystyka procesów zużycia – erozji kawitacyjnej układu przepływowego pomp wirowych

Typowym przypadkiem występowania zjawiska kawitacji w urządzeniach technicznych jest występowanie kawitacji w obszarze wlotu wirnika pompy wirowej. Krawędź wlotowa każdej łopatki porusza się z dużą prędkością powodując znaczny lokalny spadek ciśnienia cieczy dopływającej do kanałów wirnika. Występuje tu także miejscowy opór i duży oraz przyspieszony wzrost prędkości. Skutkiem powyższych zjawisk może być lokalne obniżenie ciśnienia do wartości ciśnienia krytycznego, nastąpi wówczas odparowanie cieczy. Pęcherzyki przemieszczają się wewnątrz kanału w obszar podwyższonego ciśnienia i ulegają zasklepieniu (implozji). W początkowym stadium kawitacji pękanie pęcherzyków parowo-gazowych kończy się w obrębie wirnika. Jeżeli kawitacja jest w pełni rozwinieta, to przeważająca liczba pecherzyków imploduje w wirniku, a reszta unoszona jest poza obręb wirnika do kierownicy łopatkowej, anawet do następnego stopnia pompy wielostopniowej (zależnie od prędkości przepływu). Tam dopiero następuje zapadanie się pęcherzyków kawitacyjnych i tworzenie wżerów kawitacyjnych. Opisanemu wyżej procesowi towarzyszą zjawiska mające charakter dynamiczny – zakłócenie pracy pompy związane ze zmianami parametrów energetycznych pompy, wzrost poziomu hałasu oraz drgań a w szczególności intensywne niszczenie powierzchni elementów [3,4].

Łopatki wirnika i kierownicy oraz powierzchnie wewnętrzne ścianek ograniczających ciecz przepływającą przez wnętrze pompy – stanowią układ przepływowy pompy. W przypadku pomp niszczenie elementów konstrukcyjnych części przepływowych i przewodów może być spowodowane trzema czynnikami:

- erozją; wywołaną głównie cząstkami stałymi w przepływającej cieczy,
- korozją; spowodowaną własnościami fizykochemicznymi cieczy i materiału pompy,
- kawitacją; wynikającą ze spadku ciśnienia ponżej ciśnienia krytycznego przy danej temperaturze.

Wymienione czynniki występują w czasie pracy pomp najczęściej łącznie w rzeczywistych warunkach pracy urządzenia. Zjawiskiem dominującym może być jeden z procesów. Powyższe trzy rodzaje uszkodzeń można dość łatwo rozróżnić na podstawie obserwacji makroskopowej uszkodzonych obszarów oraz ich umiejscowienia. Miejsca uszkodzone wskutek działania kawitacji przesunięte są nieco względem miejsca tworzenia się pęcherzy kawitacyjnych, w kierunku przepływu cieczy roboczej. Uszkodzenia wywołane kawitacją występują nie tylko na łopatkach, ale także na ściankach bocznych wirnika. Miejsca najniższego ciśnienia znajdują się na tylnej ściance łopatki w pobliżu krawędzi włotowej, w miejscu tym następuje przyśpieszony wzrost prędkości, co sprzyja powstawaniu zjawiska kawitacji. Uszkodzenia spowodowane erozją kawitacyjną możemy zaobserwować także na korpusach ssących i korpusach tłocznych pomp. Powstają one wskutek niewłaściwego doboru bądź uszkodzenia układu hydraulicznego – zbyt małej wysokości napływu lub zbyt dużej wysokości ssania [4,5,6].

O kawitacji występującej w pompie mogą świadczyć niżej wymienione zjawiska i procesy:

- zwiększony hałas i drgania spowodowane znacznymi pulsacjami ciśnień,
- obniżenia parametrów pracy pompy, zwłaszcza wysokości podnoszenia H, a nawet zerwanie ciągłości strugi i spadek wydajności do zera,
- zniszczenia spowodowane erozją kawitacyjną, będące najbardziej oczywistym dowodem występowania kawitacji w dostatecznie długim okresie czasu [7].

# 4. Analiza procesu zużycia oraz uszkodzeń układu przepływowego poziomych zespołów pompowych niskiego ciśnienia

Podczas eksploatacji zespołów pompowych dokonywano głównie wymiany elementów ulegających zużyciu w czasie prawidłowej pracy urządzenia. Zaliczamy do nich pierścienie uszczelniające (dociskające dławnicę), tuleję ochronną wału, pierścienie uszczelniające korpus łożyskowy oraz szczeliwo dławnicowe. Łożyska stanowiące układ łożyskowania pompy wymieniane były po założonym czasie ich użytkowania. Przeglądy były dokonywane, co sześć miesięcy. W ramach czynności związanych z przeglądem wykonywano ocenę stanu technicznego następujących elementów układu przepływowego: wirnika, pierścienia uszczelniającego Powyższe czynności realizowano zgodnie z wytycznymi dotyczącymi eksploatacji zespołu zawartymi w DTR producenta.

Zmiana warunków eksploatacyjnych zespołów nr 1 i nr 2 związana przede wszystkim z wydłużeniem czasu pracy (zdemontowaniem zespołu nr 3) była bezpośrednią przyczyną przyśpieszonego zużycia elementów i podzespołów urządzeń. Zakres remontów pomp obejmował wymianę lub regenerację elementów układu przepływowego, a w szczególności wirników, elementów układu łożyskowania oraz zespołu dławnicy (szczegółowy opis w rozdziale 2).

Najbardziej istotnym i kluczowym zagadnieniem w rozpatrywanym przypadku jest zużycie wirnika. Widoczne uszkodzenia krawędzi łopatek wlotowych oraz powierzchni kanałów przepływowych wirnika w charakterystycznej dla erozji kawitacyjnej formie wżerów wskazuje prawdopodobnie na występowanie kawitacji w układzie pompowym (rys.2). Korpus pompy nie jest uszkodzony. Lokalizacja uszkodzeń jest typowa dla tego rodzaju zużycia, a wielość ubytku materiału pozwala na stwierdzenie, że erozja kawitacyjna jest dominującą formą zużycia danego elementu. Dodatkowym czynnikiem intensyfikującym zużycie wirnika może być także erozja widoczna na krawędziach łopatek wylotowych (rys.3). Można domniemywać, że występowanie zjawiska kawitacji generuje dodatkowe dynamiczne i nieustalone obciążenia łożysk pompy oraz zespołu dławnicy.



#### Rys. 2. Wżery kawitacyjne na powierzchni kanału przepływowego wirnika

Fig. 2. Cavitation pits on the impeller-flow channel surface

Zlokalizowanie wżerów i ubytków w obszarze wlotowym wirnika pompy wskazuje na umiejscowienie źródła powstawania pęcherzyków parowogazowych prawdopodobnie w rurociągu ssawnym. Pęcherzyki przemieszczając się w obszar wlotowy wirnika gdzie następuje lokalny wzrost prędkości cieczy wraz ze zmianą kierunku oraz silne jej zawirowanie. Następuje więc dynamiczny spadek ciśnienia co może spowodować początek zjawiska kawitacji, a w konsekwencji niszczenie krawędzi wlotowych łopatek wirnika oraz kanałów przepływowych. Zjawiskiem wtórnym w rozpatrywanym przypadku może być erozja wywołana cząstkami stałymi materiału wirnika powstałymi w skutek niszczenia powierzchni.

Rozważania oparte są tylko na podstawie obrazu zużycia elementów układu przepływowego pompy. Brak informacji na temat charakterystyk przepływu pompy (przy występowaniu kawitacji) nie pozwala na określenie stopnia rozwoju kawitacji oraz na podanie dokładnej przyczyny jej występowania.

### 5. Podsumowanie wyników, rozważań i propozycje poprawy trwałości elementów układu przepływowego pomp

Sposoby zapobiegające lub zmniejszające szkodliwe działanie kawitacji (erozję kawitacyjną) można podzielić na trzy grupy: konstrukcyjne, eksploatacyjne i ruchowe oraz materiałowe. W rozpatrywanym przypadku pracy pomp wirowych jako pomp niskiego stacji wodociągowej zakładając, że przyczyna powstawania pęcherzyków parowo-gazowych zlokalizowana jest w króćcu ssawnym pompy. Możliwe jest zastosowanie rozwiązań, które zaliczają się do powyżej wymieniowych grup.

Zmiany konstrukcyjne układu przepływowego pompy mogą polegać na zastosowaniu wirnika dwustrumieniowego (o tej samej wydajności co pompa z wirnikiem jednostrumieniowym). Regulacja parametrów pracy zespołów pompowych może odbywać się przez regulację prędkości obrotowej wirnika za pomocą regulacyjnych układów tyrystorowych.

Układ pompowy można zmodyfikować stosując króciec redukcyjny skośny na rurociągu ssawnym. Eliminując tym samym niekorzystny układ geometryczny bezpośrednio przed króćcem ssącym pompy wirowej (rys.4).

Najbardziej skutecznym sposobem zminimalizowania działania kawitacji jest zastosowanie materia-



Rys. 3. Uszkodzenie kawitacyjne lopatki wirnika Fig. 3. Cavitation damage on the impeller blade

łów odpornych na erozję kawitacyjną jako tworzyw konstrukcyjnych układu przepływowego pomp niskiego ciśnienia. Odpowiednimi materiałami konstrukcyjnymi pomp wydają się być materiały z grupy staliw nierdzewnych i kwasoodpornych oraz stopów miedzi – brązów i mosiądzów. Przy doborze materiału należy zwrócić jednak szczególną uwagę własności fizyko-chemiczne pompowanego medium, aby uniknąć niekorzystnego działania cieczy na materiał.

Zastosowanie optymalnego materiału zmniejszającego szkodliwe działanie kawitacji wydaje się najbardziej prawdopodobnym sposobem rozwiązania problemu, ze względu na koszty oraz krótki czas realizacji.



Rys. 4. Zmiana przekroju przewodu ssawnego umiejscowionym bezpośrednio przed króćcem ssawnym pompy

Fig. 4. The change of the suction pipe intersection placed directly before the pump suction body

#### 6. Literatura

- [1] Pompy wirowe jednostopniowe poziome typu A. WAFAPOMP S.A. 2003.
- [2] Agregat pompy wirowej typu A. Dokumentacja Techniczno-Ruchowa Nr 1789. Warszawska Fabryka Pomp im. A. Kowalskiego.
- [3] Świtalski P.: Słownik Pomp i Pompowni Kawitacja. Pompy Pompownie nr 4 (54), Kwiecień 1997.
- [4] Łazarkiewicz S., Troskolański T.: *Pompy wirowe*. WNT, Warszawa, 1973.
- [5] Korczak A.: Kawitacja i erozja kawitacyjna w pompie wirowej. Pompy Pompownie nr 4 (78), Kwiecień 1999.
- [6] Koziej A.: Proces erozji kawitacyjnej elementów układu przepływowego pomp wirowych. Materiały konferencyjne II Sympozjum Doktoranckie "Współczesne technologie w budowie maszyn" Kazimierz Dolny 2003.
- [7] Jędral W.: Pompy wirowe. WNT, Warszawa 2001.

### Mgr inż. Adam KOZIEJ

Katedra Inżynierii Materiałowej Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin e-mail: adam.koziej.@mpwik.lublin.pl

## MODELOWANIE METODĄ CFD PRACY ŁOPATEK W POMPIE ŁOPATKOWEJ

### CFD MODELING OF VANE PUMP VANES OPERATION

W pracy podjęto analizę przepływu między łopatką a statorem pompy dla uzyskania korzystnych warunków pracy jakimi są: występowanie płynnego tarcia i szczelność układu. Odpowiedni docisk łopatki w połączeniu z odpowiednimi rozwiązaniem geometrii tego zespołu ma istotne znaczenie dla uzyskania wysokiej sprawności i trwałości pompy. Do tego celu niezbędnym jest określenie wzorcowej siły docisku jaką powinien realizować układ hydrauliczny. Do realizacji tego celu zastosowano metody modelowania CAD i CFD. W referacie zostaną przedstawione wyniki uzyskane w badaniach modelowych.

Słowa kluczowe: Pompa łopatkowa, CFD, tarcie płynne, szczelność, przecieki, sprawność

The paper covers the problem of the flow between the blade and stator in order to achieve advantageous work condition, which is the presence of fluid friction and leak tightness of the system. The suitable contact force of the vane against stator, together with properly determined system geometry, has a significant influence on achieving high efficiency and life of the pump. In order to achieve this purpose it is necessary to determine the master value of the contact force that the system must generate. CAD and CFD modeling methods have been used to reach the objective. The results of model analysis will be presented in the full paper.

Keywords: Vane pump, CFD, fluid friction, leak tightness, leakage, efficiency

#### 1. Wstęp

W nowoczesnych układach hydraulicznych i paliwowych szeroko stosowane są pompy łopatkowe. Cechuje je przede wszystkim mała pulsacja, odporność na zanieczyszczenia oraz cichobieżność.

Istotnym wskaźnikiem funkcjonalności pompy łopatkowej jest jej sprawność całkowita będąca iloczynem sprawności objętościowej i sprawności hydrauliczno-mechanicznej [1]:

$$\eta_g = \eta_{vg} \cdot \eta_{hmg} \tag{1}$$

gdzie:  $\eta_{g}~$  – sprawność całkowita,  $\eta_{vg}$  – sprawność objętościowa,  $\eta_{hmg}$  – sprawność hydrauliczno - mechaniczna.

Sprawność objętościowa ulega zmniejszeniu na skutek występowania podczas pracy pompy przecieków między elementami pompy, np. między sąsiednimi komorami. W pracy podjęto analizę szczeliny występującej między szczytem łopatki rozdzielającej komory wyporowe a bieżnią ruchomego statora. Dla poprawienia sprawności objętościowej należy dążyć do całkowitego wyeliminowania szczeliny w badanym obszarze. Jednak całkowite wyeliminowanie szczeliny prowadziłoby do warunków pracy przy tarciu suchym lub granicznym. Takie warunki pracy mają niekorzystny wpływ na sprawność mechaniczną pompy. Według [1] w układach bez odciążenia 2/3 strat hydrauliczno-mechanicznych powstaje na skutek tarcia łopatek o bieżnię. Aby nie zwiększać strat mechanicznych należy dążyć do zapewnienia warunków tarcia płynnego co można uzyskać przez obecność warstwy smarnej między łopatką a bieżnią statora.

#### 2. Obiekt modelowania

Obiektem modelowania jest pompa łopatkowa, z opatkami wirującymi, o zmiennej wydajność (rys. 1.) działająca na zasadzie przetłaczania, czynnika z przestrzeni ssawnej 1 do tłocznej 2. Komory wyporowe, utworzone przez łopatki 4, części obwodu wirnika 3 i statora 5, zmieniają swą objętość wraz z obrotem wirnika 3. Zamknięcia komór w kierunku osiowym stanowią płaszczyzny pokryw czołowych. Przesuwne łopatki są usytuowane w wirniku.


Rys. 1. Pompa lopatkowa – schemat działania Fig. 1. Vane pump – operating diagram

#### 3. Analiza trybologiczna

Warunki tarcia płynnego zachodzą jeżeli pomiędzy współpracującymi powierzchniami istnieje rozdzielająca je warstwa smarna. Według [2] kryterium podziału smarowania może być względna grubość warstwy smarującej:

$$R = \frac{h}{R_{a1} + R_{a2}} \tag{2}$$

gdzie: R – względna grubość warstwy smarującej,  $R_{al}$ ,  $R_{a2}$  – średnie odchylenie od linii środkowej nierówności współpracujących powierzchni, *h*-szerokość szczeliny.

Dla uzyskania warunków tarcia płynnego przyjmuje się [2] :

$$5 \le R \le 100 \tag{3}$$

W badanym przypadku:  $R_{a1}=2 \mu m$ ,  $R_{a2}=0.8 \mu m$ . Z (2) i (3) wynika, że:

$$14\mu m \le h \le 280\mu m$$

Przyjęcie dużej wartości szczeliny skutkowałoby dużymi przeciekami co jest niekorzystne ze względu na sprawność objętościową. Dla zachowania jak największej sprawności objętościowej w przeprowadzonych analizach przyjęto wartość szczeliny zbliżoną do minimalnej.

 $h = 20 \mu m$  - co daje  $R \approx 7, l > 5 \mu m$ ,

### 4. Analiza CFD

#### 4.1. Podstawy CFD

Analiza CFD bazuje na układzie równań pozwalającym wyznaczyć pole prędkości oraz pole ciśnień. Pierwsze z nich to równanie ciągłości przepływu [3]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

gdzie: x, y, z – współrzędne w układzie kartezjańskim,  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  – składowe prędkości,  $\rho$  – gęstość, t – czas.

Drugi człon układu równań wynika z trzech równań Naviera-Stokesa dla cieczy lepkiej, w zapisie wektorowym [3]:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \operatorname{gradp} + v\Delta \vec{V}$$
(5)

gdzie:  $\vec{V}$  – pole prędkości,  $\vec{F}$  – pole jednostkowych sił masowych, p – pole ciśnień,  $\rho$  – pole gęstości, v - lepkość.

Poczynione założenia: ciecz Newtonowska, przepływ nieściśliwy, gęstość stała, lepkość stała, temperatura stała.

#### 4.2. Przeprowadzone analizy

Wykonano analizy przepływu czynnika w układzie wał-łopatka-stator. Zbadano trzy różne kształty szczytów łopatek. Ponadto układ badano w przypadku sąsiednich komór o takich samych ciśnieniach oraz w przypadku różnicy ciśnień 20 MPa między dwoma sąsiednimi komorami. Analizy wykonano za pomocą programu Ansys/Flotran. Analizę przeprowadzono w Obrotowym Układzie Odniesienia (Rotating Frame of Reference) [6]. Analizy przeprowadzono na modelu płaskim.

- Przyjęto następujące parametry [4]:
  - Ciecz robocza: olej mineralny,
  - Gęstość ρ=950 kg/m<sup>3</sup>,
  - Nominalna lepkość kinematyczna v=37 mm²/s (przy temp. 328°K),
  - Prędkość obrotowa wirnika ω=151.8 rad/s (1450 obr/min).

Badane profile szczytu łopatki to zarys zaokrąglony promieniem R4 rys. 3. a), zarys łopatki podwójnej rys. 3. b) oraz zarys według profil NACA 4510 [5] rys. 3. c). Geometrię dwuwymiarową dla potrzeb przeprowadzonych analiz MES przygotowano w programie Unigraphics w oparciu o model przestrzenny przedstawiony na rys. 2.

Geometrię łopatek i przygotowane modele dyskretne przedstawia rys. 3:

W pierwszej fazie wykonana została analiza CFD z zastosowaniem elementu Fluid 141. Nałożone warunki brzegowe to: na wewnętrznej powierzchni cylindrycznej prędkość wynosi 0, na powierzchni cylindrycznej zewnętrznej prędkość obwodowa wynosi –6.5274 m/s, ponadto powierzchnia ta została określona jako powierzchnia ruchoma. Względny



Rys. 2. Model przestrzenny pompy łopatkowej Fig. 2. Three-dimensional moel of vane pump







układ odniesienia obraca się z prędkością 151.8 rad/s (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara). Po uzyskaniu pola prędkości oraz pola ciśnień przeprowadzona została analiza strukturalna części łopatki wystającej z gniazda wirnika. Do zbudowania modelu dyskretnego łopatki użyto elementu Plane 42 z zadaną grubością 25 mm. Jako obciążenie przyłożone zostało pole ciśnienia uzyskane w poprzedzającej analizie CFD. Z analizy strukturalnej uzyskano składowe sił w utwierdzeniu łopatki pochodzące od obciążenia ciśnieniem. W wyniku przeprowadzonych analiz CFD uzyskano rozkład pola prędkości i pola ciśnienia, w przypadku komór w strefie ssawnej przedstawione na rys. 4, 5 i 6.

Wyniki przy różnicy ciśnień między komorami wynoszącej 20 MPa przedstawiają rys. 7, 8 i 9.

Wykorzystując uzyskany rozkład ciśnienia na powierzchniach łopatek dokonano analizy łopatek jako elementów strukturalnych obciążonych ciśnieniem. Wyznaczone siły powstające w łopatce od działania ciśnienia zestawiono w tablicy 1.



*Rys. 4. Rozkład prędkości dla kształtu o wierzchołku zaokrąglonym dla komór w strefie ssawnej Fig. 4. Velocity distribution for blade with radiused tip for chambers in suction zone* 



*Rys. 5. Rozklad prędkości dla lopatki podwójnej dla komór w strefie ssawnej Fig. 5. Velocity distribution for double blade for chambers in suction zone* 



Rys. 6. Rozkład prędkości dla kształtu o wierzcholku wg profilu NACA 4510 dla komór w strefie ssawnej Fig. 6. Velocity distribution for) cross section based on NACA 4510 profile for chambers in suction zone



- Rys. 7. Wyniki dla kształtu o wierzchołku zaokrąglonym przy różnicy ciśnień 20 MPa: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia
- *Fig. 7. Analysis results for blade with radiused tip with 20 MPa of pressure drop between adjacent chambers: a) velocity distribution. b) pressure distribution*



Rys. 8. Wyniki dla łopatki podwójnej (wylot) przy różnicy ciśnień 20 MPa: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia
Fig. 8. Analysis results for double blade with 20 MPa of pressure drop between adjacent chambers: a) velocity distribution b) pressure distribution



- Rys. 9. Wyniki dla kształtu o wierzchołku wg profilu NACA 4510 przy różnicy ciśnień 20 MPa: a) rozkład prędkości, b) rozkład ciśnienia
- *Fig. 9. Analysis results for cross section based on NACA 4510 profile with 20 MPa of pressure drop between adjacent chambers: a) velocity distribution. b) pressure distribution*

Rodzaj łopatki	FX [N] Składowa promieniowa	FY [N] Składowa styczna		
Zaokrąglona	-784.21	-2964.7		
Ponar – lewa	-946.22	-2140.2		
Ponar – prawa	-788.11	-384.61		
NACA	-648.04	-2559.9		

Tab. 1. Siły w łopatce od ciśnienia - w układzie cylindrycznymTab. 1. Pressure derivative forces in blade – in cylindrical coordinate system

### 5. Wnioski

Przeprowadzone analizy CFD pozwalają stwierdzić, że zawirowania powstające wewnątrz komory w przypadku rozwiązania z łopatką podwójną są większe niż w pozostałych przypadkach, najmniejsze są w przypadku profilu o zaokrąglonym wierzchołku. W przypadku rozwiązania z łopatką podwójną ciecz przy przechodzeniu przez szczelinę osiąga największą prędkość w porównaniu do pozostałych rozwiązań. Najmniejsza prędkość przepływu, a tym samym

przeciek, został uzyskany przy zastosowaniu profilu NACA. Zastosowanie profilu NACA pozwala również uzyskać najmniejsze siły promieniową i styczną. Zebrane obserwacje sugerują zastosowanie kształtu profilu w którym strefa wlotowa będzie odpowiadała zaokrągleniu łopaty, co pozwoli zmniejszyć zawirowania, natomiast strefa wylotowa będzie zbliżona kształtem do badanego profilu NACA, co pozwoli uzyskać małe przecieki i małe siły w łopatce.

### 6. Literatura

- [1] Stryczek S.: Napęd hydrostatyczny. Elementy, Warszawa, WNT, 1997.
- [2] Hebda M., Wachal A.: Trybologia. Warszawa, WNT, 1980.
- [3] Kosma Z.: Podstawy mechaniki płynów, Radom, Politechnika Radomska, Wydawnictwo, 2002.
- [4] Materiały informacyjne producenta Pompa łopatkowa zmiennej wydajności UPLV-32, Ponar Wadowice.
- [5] http://www.ctaz.com/~kelcomp/airfoils5.htm.
- [6] Dokumentacja programu ANSYS.

### Dr hab. inż. Edward LISOWSKI – prof. PK

Mgr inż. Michał PANEK Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny Instytut Informatyki Stosowanej al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków lisowski@mech.pk.edu.pl michal.panek@poczta.fm

# MODELOWANIE ZESPOŁU NAPĘDOWEGO WINDY CREATION OF LIFT MACHINE MODEL

Artykuł przedstawia krótkie charakterystyki poszczególnych podzespołów takich jak: sprzęgło, przekładnia mechaniczna, hamulec wchodzących w skład typowego zespołu napędowego. Przedstawiony jest również schemat obciążenia zespołu napędowego windy oraz schematy: zastępczy i dynamiczny wraz z opisującymi je zależnościami matematycznymi według zasady D'Alamberta.

*Słowa kluczowe:* dźwig elektryczny, model dynamiczny, model zastępczy, zasada D'Alamberta

This article presents short characteristics of individual components as: a coupling, a gear, and a brake which are elements of a typical of drive unit. It also shows a scheme of an elevator driver unit load and the following schemes: a substitute model and a dynamical model with mathematical relations describing them according to the D'Alambert principle.

Keywords: elevator, dynamical model, substitute model, D'Alambert's principle

### 1. Wstęp

Modelowanie zespołu napędowego jest zagadnieniem bardzo trudnym i złożonym. W stanie ustalonym, w układzie są generowane drgania wpływająca niekorzystnie na strukturę całego urządzenia. Modelowanie układu mechanicznego sprowadza się do zastąpienia układu rzeczywistego, układem mechanicznym zastępczym, który stanowi podstawę do opisu matematycznego. Wybór modelu zastępczego zależy z jednej strony od korzyści wynikających z prostoty modelu, a z drugiej strony, możliwości uzyskania dokładności wynikowych, które nas w danym czasie interesują.

### 2. Wiadomości ogólne

Większość urządzeń technicznych dla zapewnienia ruchów posiada różnego rodzaju napędy. Struktura napędu składa się z następujących zespołów:

- 1. silnika elektrycznego,
- 2. sprzęgła,
- 3. przekładni mechanicznej,
- 4. hamulca,
- 5. elementów sterujących.

Pierwszą grupę zespołów wchodzących w skład napędu są silniki. Do napędzania maszyn stosowane są silniki różnego rodzaju w zależności od potrzeb oraz wymagań eksploatacyjnych maszyny, między innymi.: silniki asynchroniczne, synchroniczne, krokowe. Drugą grupą zespołów stosowanych w napędach są sprzęgła. Sprzęgło jest to zespół, który służy do połączenia dwóch obrotowych, niezależnie osadzonych elementów maszyn, w celu przekazania momentu obrotowego i prędkości obrotowej bez zmiany jego kierunku działania [4]. Kolejną grupę podzespołów stosowanych w napędach stanowią hamulce. Hamulcami nazywamy urządzenia zamieniające energię kinetyczną układu napędzanego na energię cieplną, w celu zmniejszenia prędkości lub całkowitego zatrzymania elementów układu. [4]. Przedostatnią grupę podzespołów stanowią przekładnie mechaniczne. Przekładnie mechaniczne służą do zwielokrotniania (multiplikatory) lub zmniejszania prędkości i momentu obrotowego przekazywanego z silnika elektrycznego. Przekładnie mechaniczne mogą być stosowane w różnych odmianach. Do najbardziej znanych możemy zaliczyć tutaj przekładnie: pasowe, łańcuchowe, ślimakowe, cierne, zębate. Wbranży dźwigowej najczęściej stosowaną przekładnią reduktorową są przekładnie ślimakowe.

### 3. Charakterystyka napędu

Dźwig osobowy (winda) z napędem ciernym napędzana jest napędem składającym się z w/w zespołów. Na rys. 1 przedstawiony jest układ napędu wraz z obciążeniami, jakie oddziałują na zespół napędowy.

Zespół napędowy przedstawiony na rys. 1. zastępujemy układem zastępczym przedstawionym na rys. 2..

Schemat z rys. 2. zastępujemy modelem dynamicznym masowo-sprężysto-tłumiącycm, (UMST), który stanowi podstawę matematycznego opisu układu. [3]. Na rys. 3. przedstawiony jest model dynamiczny układu napędowego.

Korzystając z zasady d'Alamberta, dla powyż-



- Rys. 1. Układ napędu dźwigu wraz z obciążeniami: 1-koło cierne o średnicy D, 2-koło zdawcze o średnicy d, 3-sprzęgło podatne, 4-hamulec, 5-silnik elektryczny, 6-reduktor, 7-liny nośne, P-masa kabiny wraz z ramą, Q-udźwig nominalny, K-masa przeciwwagi, A,B,C-wymiary
- Fig. 1. Elevator drive system with load: 1-sheave of a D diameter, 2-diverted pulley of a d diameter, 3-flexible coupling, 4-brake, 5-electrical motor, 6-reducer, 7-lifting ropes, P-cabin mass with frame, Q-nominal load, K-counterweight mass, A,B,C-dimensions



- Rys. 2. Schemat zastępczy zespołu napędowego windy: c sztywność zastępcza wału silnika i ślimaka reduktora, k zastępczy współczynnik tłumienia wału silnika i ślimaka reduktora,  $ø_1$ -prędkość kątowa wirnika,  $ø_2$ -prędkść kątowa wału ślimacznicy,  $M_p$ ,  $M_2$ -momenty: rozruchowy ślinka i obciążenia układu,  $Q_E$ ,  $Q_{ob}$ -momenty bezwładności wirnika i koła ciernego
- Fig. 2. Substitute scheme of an elevator drive system: c-substitute rigidity of motor shaft and reducer worm, k-substitute suppression factor of motor shaft and reducer worm,  $ø_1$ -rotor angle speed,  $ø_2$ -wormwheel shaft angle speed,  $M_p$ ,  $M_2$ -moments of: starting an engine and system load,  $Q_E$ ,  $Q_{ob}$ -rotor moment of inertia and sheave moment of inertia



- Rys. 3. Model dynamiczny UMST zespołu napędowego windy: c-sztywność zastępcza walu silnika i ślimaka reduktora, k-zastępczy współczynnik tłumienia walu silnika i ślimaka reduktora, ø<sub>E</sub>-prędkość kątowa wirnika, ø<sub>ob</sub>- prędkść kątowa wału ślimacznicy, M<sub>E</sub>, M<sub>ob</sub>-momenty: rozruchowy ślinka i obciążenia układu, Q<sub>E</sub>, Q<sub>ob</sub>- momenty bezwładności wirnika i koła ciernego
- Fig. 3. UMST dynamic model of elevator drive system: *c* substitute rigidity of motor shaft and reducer worm, *k*- substitute suppression factor of motor shaft and reducer worm,  $ø_E$ - rotor angle speed,  $ø_{ob}$ - wormwheel shaft angle speed,  $M_E$ ,  $M_{ob}$ - moments of: starting an engine and system load,  $Q_E$ ,  $Q_{ob}$ - rotor moment of inertia and sheave moment of inertia

EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOŚĆ NR 2/2004

szego układu oraz rozdzielając go myślowo na dwie części, równania opisujące układ można zapisać następująco:

$$\begin{array}{l}
Q_{E}\ddot{\varphi}_{E} + k(\dot{\varphi}_{E} - \dot{\varphi}_{ob}) + c(\varphi_{E} - \varphi_{ob}) = M_{E} \\
Q_{ob}\ddot{\varphi}_{ob} - k(\dot{\varphi}_{E} - \dot{\varphi}_{ob}) - c(\varphi_{E} - \varphi_{ob}) = -M_{ob}
\end{array} (1)$$

Porządkując równania wyrazami, otrzymujemy poniższą postać:

$$\begin{aligned}
\mathcal{Q}_{E}\ddot{\varphi}_{E} + k(\dot{\varphi}_{E} - \dot{\varphi}_{ob}) + c(\varphi_{E} - \varphi_{ob}) &= M_{E} \\
\mathcal{Q}_{ob}\ddot{\varphi}_{ob} - k(\dot{\varphi}_{E} - \dot{\varphi}_{ob}) - c(\varphi_{E} - \varphi_{ob}) &= -M_{ob}
\end{aligned}$$
(2)

Układ równań (2) można sprowadzić do jednego równania drgań względnych skrętnych, w wyniku dzielenia równań przez momenty bezwładności, co przedstawia postać (3) [2]:

$$\mathcal{Q}_{E}\ddot{\varphi}_{E} + k(\dot{\varphi}_{E} - \dot{\varphi}_{ob}) + c(\varphi_{E} - \varphi_{ob}) = M_{E}$$
  
$$\mathcal{Q}_{ob}\ddot{\varphi}_{ob} - k(\dot{\varphi}_{E} - \dot{\varphi}_{ob}) - c(\varphi_{E} - \varphi_{ob}) = -M_{ob}$$
(3)

oraz dodania tych równań stronami, wprowadzając dodatkowo nową współrzędną kata skręcenia:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \tag{4}$$

$$\ddot{\varphi} + k \frac{Q_E + Q_{ob}}{Q_E \cdot Q_{ob}} \dot{\varphi} + c \frac{Q_E + Q_{ob}}{Q_E \cdot Q_{ob}} \varphi = \frac{M_E Q_E}{Q_I}$$
(5)

Z członu sztywności równania (5) można wyliczyć częstość kołową względnych drgań skrętnych układu:

$$\omega = \sqrt{c \frac{Q_E + Q_{ob}}{Q_E \cdot Q_{ob}}} \tag{6}$$

Rozwiązując tego typu równania, możemy oczywiście posługiwać się różnymi programami np.: Matlab, dzięki którym jesteśmy w stanie odtworzyć charakterystyki czasowe interesujących nas parametrów. W zależności od potrzeb równania różniczkowe opisujące stany pracy urządzeń napędowych, można zapisać również za pomocą rachunku macierzowego lub za pomocą równań Lagrange'a II rodzaju [1].

#### 4. Zakończenie

Modelowanie ma na celu przewidzenie pewnych sytuacji, które mogą mieć istotny wpływ na całą późniejszą pracę zespołu. Analiza otrzymanych wyników i wprowadzanie poprawek, pozwala uniknąć niepotrzebnych defektów poszczególnych podzespołów w czasie pracy. Wizualizacja pewnych parametrów umożliwia zastosowanie odpowiednich podzespołów, korzystnie wpływających na całą prace zespołu napędowego np.: dobór odpowiedniej amortyzacji całego korpusu. Ogólnie można stwierdzić, że nie jest istotne, w jaki sposób wykonujemy analizy, ważne jest, aby późniejsza praca całego zespołu napędowego przebiegała bez większych zakłóceń oraz trwałość była jak najdłuższa.

#### 5. Literatura

- [1] Giergiel .: Tłumienie drgań mechanicznych, Wydawnictwo PWN, 1990.
- [2] Leyko J.: Mechanika ogólna T2, Wydawnictwo PWN, 1982.
- [3] Mielczarek M., Mieszkowski J., Pasek Z., Karbowski Z., Wrotny L.: Projektowanie napędów obrabiarek, obliczenia konstrukcyjne, Wydawnictwo PW, 1991.
- [4] Wrotny L.: Dynamika układów mechanicznych, Oficyna wydawnicza PW, 1995.

### Mgr inż. Paweł LONKWIC

Lift Sernice S.A. UI. Roztocze 6 20-722 Lublin e-mail: plonkwic@lift .pl

### REKONSTRUKCJA GEOMETRII OBIEKTÓW PRZESTRZENNYCH PRZY ZREDUKOWANEJ ILOŚCI DANYCH POMIAROWYCH

### GEOMETRY RECONSTRUCTION OF THE THREE-DIMENSIONAL OBJECTS WITH LIMITED QUANTITY OF MEASUREMENT DATA

Budowa trójwymiarowych modeli używanych w systemach CAx, wymaga precyzyjnych danych geometrycznych. W zależności od aplikacji, konieczne jest pozyskanie (oprócz danych geometrycznych) dodatkowych danych takich jak: gęstość, tekstura powierzchni, itp. Autor prezentuje metody rekonstrukcji trójwymiarowych modeli w programach CAD i przedstawia koncepcję praktycznego zastosowania POD (Proper Orthogonal Decomposition). Trójwymiarowa rekonstrukcja POD bazuje na modach statystycznych opisujących obiekt 3D.

*Slowa kluczowe:* rekonstrukcja 3D, skanery 3D, oprogramowanie CAD, POD (Proper Orthogonal Decomposition).

The construction of three-dimensional models used in CAx systems, to require precision geometrical data of the real object is presented. Depending on application, it is necessary to obtain (besides geometrical dimensions) additional data such as: volume density, texture of the surface, etc. Author shows method of reconstruction 3D models in CAD software and presents conception of practicable Proper Orthogonal Decomposition (POD). The POD 3D reconstruction bases on the statistical modes which describe the 3D object.

*Keywords:* 3D reconstruction, 3D scanners, CAD software, Proper Orthogonal Decomposition (POD).

### 1. Wprowadzenie

Obecnie, wiele inżynierskich narzędzi CAx znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauki – między innymi w medycynie – tworząc nowe dyscypliny takie jak np. biomechanika, biocybernetyka, bioinżynieria, itd. Te interdyscyplinarne kierunki wykorzystują możliwości inżynierii odwrotnej, trójwymiarowego modelowania i symulacji, analizy wytrzymałościowej MES, jak również urządzeń do szybkiego prototypowania i obrabiarek NC.

Istotnym zagadnieniem w wielu aplikacjach jest akwizycja danych i obróbka trójwymiarowych modeli. Trójwymiarowe wirtualne modele posiadają wiele zastosowań. W medycynie są to: wizualizacja tkanek (modele oddają kształt i rozmiary poszczególnych organów), diagnostyka medyczna (np. wirtualna endoskopia), planowanie "przedchirurgicznne" (symulacje operacji chirurgicznych), analizie MES (np. wyznaczenie wytrzymałości kości przy osteoporozie). W większości zastosowań "czysto" medycznych, wystarczająca jest tylko wizualizacja. Technologie CAx wymagają znacznie dokładniejszych danych, umożliwiających wykonanie siatki MES, czy też wygenerowanie ścieżki narzędzia dla maszyny CNC.

### 2. Metody rekonstrukcji modeli 3D

W zależności od dziedziny jak i aplikacji rekonstruowanego modelu 3D, stosuje się różne metody akwizycji danych pomiarowych. Dwie podstawowe grupy to urządzenia działające jako: stykowe lub bezstykowe.

W przemyśle maszynowym najbardziej rozpowszechnionymi urządzeniami są współrzędnościowe maszyny pomiarowe, ramiona pomiarowe (metody stykowe) oraz skanery laserowe i radarowe (metody bezstykowe). W innych gałęziach wykorzystuje się urządzenia wyspecjalizowane, np. w medycynie tomografy komputerowe CT, lub urządzenia obrazowania rezonansu magnetycznego NMR.

Rezultatem procesu pomiarowego są dane wróżnej postaci [1] (rys. 1.): a) rozproszonej (tzw. chmura punktów), b) konturowej (tzw. krzywe spline), c) objętościowej (obrazy z rezonansu i tomografii komputerowej).

W celu otrzymania modelu wirtualnego należy dane pomiarowe przetworzyć korzystając z algorytmów odwzorowujących powierzchniowo lub bryłowo (objętościowo). Wybór odpowiedniego algorytmu jest istotny zarówno ze względu na przebieg samego procesu, jak i rezultat końcowy, którym może być siatka powierzchniowa, bryła czy też objętościowa siatka



Rys. 1. Przykłady danych pomiarowych: a) zapis rozproszony, b) zapis konturowy, c) zapis objętościowy Fig. 1. Exaples of measuring data: a) disperse data, b) contour data (splines), c) volume data

MES. Poszczególne metody posiadają liczne ograniczenia a uzyskane efekty nie zawsze umożliwiają ich zastosowanie w programach CAx [3].

Najczęściej stosowane metody rekonstrukcji to:

- rekonstrukcja powierzchniowa w procesie triangulacji na wejściowej chmurze punktów generuje się powierzchniowa siatkę trójkątną. Przy obiektach o złożonym kształcie powstają liczne błędy, które uniemożliwiają wykonanie modelu bryłowego w programach CAD.
- rekonstrukcja bryłowa (operacja "Loft") współczesne systemy CAD umożliwiają zamianę danych konturowych w model bryłowy poprzez zastosowanie operacji "Loft". Rezultatem takiej operacji jest powierzchnia typu NURBS. Wadą tego rozwiązania jest konieczność stosowania wielu krzywych prowadzących, względem których rozpinana jest powierzchnia, oraz złożoność procedury wynikająca z niedoskonałości algorytmów przy przetwarzaniu skomplikowanych kształtów geometrycznych.
- bezpośrednia generacja siatki MES metoda możliwa do zastosowania, gdy dane pomiarowe są zapisane w postaci konturowej (szereg przekrojów). Metoda ta jest oparta na rekonstrukcji Delanuaya [7, 8, 9, 10], ogranicza się jednak tylko do MES i nie pozwala na obróbkę w programach CAD lub CAM.

#### 3. Rekonstrukcja w oparciu o mody empiryczne

Przykłady przedstawione w poprzednim rozdziale głównie omawiają sposoby rekonstrukcji powierzchni obiektów, przy pełnej liczbie danych pomiarowych. Metod tych praktycznie nie można użyć w sytuacji gdy liczba danych jest ograniczona i niewystarczająca. Jest to szczególnie częsty przypadek w zastosowaniach medycznych, gdy jako dane wejściowe otrzymujemy szereg przekrojów (obrazów CT, NMR) lub zdjęć RTG.

Opisana poniżej metoda pozwala zrekonstruować trójwymiarowy model złożonego geometrycznie obiektu w oparciu o ograniczoną liczbę danych pomiarowych (np. zdjęcia RTG wykonane w różnych płaszczyznach) oraz wiedzę uzupełniającą, w postaci trójwymiarowych modeli wzorcowych (przechowywanych w bazie danych).

Algorytm postępowania jest następujący: dwa zdjęcia RTG (w dwóch płaszczyznach) porównane są ze sztucznie wygenerowanymi obrazami DRR (modeli wzorcowych – z bazy danych). Na tej podstawie wybrany zostaje najbardziej zbliżony geometrycznie model 3D. Różnice wynikające z odrębnej budowy poszczególnych osobników korygowane są w procesie kalibracji i deformacji (przepływ pikseli w znanych przekrojach przekłada się na cały model).

Do odbudowy geometrii 3D użyto rekonstrukcji "nisko-wymiarowej" ("low–dimensional"), bazującej na metodzie POD (Proper Orthogonal Decomposition) [12], znanej również pod nazwą Karhunen-Loeve Decomposition (PCA).

Analizie POD poddano zestaw przekrojów (za przykład posłużyły obrazy ludzkiej głowy) w postaci czarno-białych bitmap o rozdzielczości i 100x100 pikseli, ułożonych promieniście wokół osi symetrii (rys. 2.).

Dla zestawu przekrojów (np. P=180) tworzona jest macierz wejściowa X o rozmiarze NxP (gdzie N liczba punktów bitmapy), i wyznaczana średnia:

$$x_i \to x_i - m \tag{1}$$

gdzie

$$m = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^{P} x_i \tag{2}$$

Następnie tworzona jest macierz korelacji:

$$C = X X^T \tag{3}$$

i wyznaczane są wektory własne i wartości własne. Wektory własne w połączeniu z największymi wartościami własnymi określają największe różnice między poszczególnymi przekrojami. W celu rekonstrukcji modelu w oparciu o zestaw modów wykonuje się rzutowanie na przestrzeń własną:



*Rys. 2. Układ poszczególnych przekrojów, przykładowe bitmapy i DRR Fig. 2. Arrangement of input data slices, several bitmaps and DRR* 

$$x_i' = \mathbf{v}^T x_i \tag{4}$$

gdzie  $x'_i$  - mody, V - wektor własny.

W wyniku dokonanej analizy otrzymano bitmapę przedstawiającą średnią wartość ze wszystkich przekrojów, zestaw modów opisujących poszczególne przekroje (tabela 1.), oraz poszczególne współczynniki (rys 3.). Do rekonstrukcji wykorzystano 15 modów, które dostarczają 99,04% informacji o geometrii.

Dla lepszego zilustrowania poszczególnych modów dokonano ich wizualizacji w środowisku trójwymiarowym. Poniżej przedstawiono trójwymiarową rekonstrukcję pierwszych pięciu modów dla modelu głowy (rys. 4.).

Każdy kolejny mod jest odpowiedzialny za inne części obiektu i dodając do wartości średniej poszczególne mody można otrzymać model o zadanej dokładności odwzorowania. Mod pierwszy przenosi informację dotyczącą wyoblenia głowy w płaszczyźnie pionowej. Mod drugi natomiast przechowuje dane dotyczące cech twarzy oraz części szyi i tyłu głowy. Każdy kolejny mod dostarcza coraz drobniejszych detali. Dzięki temu możliwe jest zrekonstruowanie modelu z wybranych części lub na określonym poziomie szczegółowości. Przy wyznaczeniu optymalnej liczby modów (różna dla różnych obiektów) można wykonać rekonstrukcję modelu "odcinając" niepożądane szumy informacyjne (często spotykane przy danych rozproszonych), przy jednoczesnym zachowaniu dużej dokładności odwzorowania. W przypadku prezentowanej głowy liczba modów użytych do pełnej rekonstrukcji i eksportu do systemu CAD wyniosła 15 modów (rys. 5).

Końcowym rezultatem jest trójwymiarowy model bryłowy (rys. 6.), który można dowolnie obrabiać narzędziami znajdującymi się w programach CAx (np. budowa siatki MES, generowanie ścieżki narzędzia dla obrabiarek NC, itp.)

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych prób generowania modeli bryłowych można stwierdzić, że proste geometrycznie modele 3D pozwalają przejść od siatki powierzchniowej do modeli bryłowych lub wprost do trójwymiarowej siatki MES. Ze względu jednak na złożoności kształtu niektórych obiektów oraz niewystarczającej liczby danych pomiarowych często nie jest możliwe wykonanie trójwymiarowych modeli bryłowych a tym samym niemożność zastosowania w programach CAx.

Analiza modalna obiektów 3D umożliwia redukcję liczby parametrów koniecznych do jednoznacznego opisu geometrii poszczególnych modeli. Pozwala także na wyeliminowanie błędów pomiarowych ("szumy" pomiarowe), oraz odbudowę modelu na zadanym poziomie szczegółowości.

Tab. I.	Poziom odwzorowania poszczególnych modów
Tab. 1.	Level of mapping individual modes

Mod	Udział modu w odwzorowywaniu [%]	Sumaryczny stopień odwzorowania [%]
1	46.88	46.88
2	30.07	76.95
3	6.56	83.52
4	5.74	89.26
5	2.65	91.91
6	1.72	93.63
7	1.40	95.03
8	1.08	96.11
9	0.87	96.98
10	0.53	97.51
11	0.51	98.02
12	0.34	98.36
13	0.28	98.64
14	0.22	98.86
15	0.17	99.04



Rys. 3. Wykres wartości współczynników dla poszczególnych przekroi (dla pierwszych trzech modów) Fig. 3. Coefficients values in individual slices



*Rys. 4. Trójwymiarowa rekonstrukcja pięciu pierwszych modów Fig. 4. Three dimensional reconstructions the first five modes* 



*Rys. 5. Trójwymiarowa rekonstrukcja modelu głowy dla różnej liczby modów Fig. 5. Three dimensional reconstructions human head for different number of modes* 

Zastosowanie metody opartej na porównaniu tradycyjnych zdjęć RTG z syntetycznymi zdjęciami DRR i bazie obiektów porównawczych, umożliwia wykonywanie precyzyjnych modeli CAD przy zredukowanej liczbie danych pomiarowych. Natomiast kalibracja i deformacja modelu, umożliwia wprowadzenie indywidualnych poprawek, charakterystycznych dla danego pacjenta. Ponieważ metoda ta wykorzystuje powszechnie spotykane zdjęcia RTG, zatem nie wymaga specjalistycznych środków, co czyni tę metodę ogólnie dostępną i tanią.

Każdy nowo zrekonstruowany model może zostać wprowadzony do bazy danych, co pozwala go wykorzystać w kolejnych rekonstrukcjach. Dzięki temu można utworzyć bardzo bogatą trójwymiarową bazę antropometryczną (np, kręgów kręgosłupa).

### 5. Literatura

- [1] Projekt KBN 8T07A04621, kier T. Łodygowski: Odkształcenia trzonów kręgów ludzkiego kręgosłupa wzależności od zmian ich własności konstytutywnych i zwyrodnieniowych, 2001-2004.
- [2] Ogurkowska M.B., Morzyński M., Nowak M., Roszak R., Rychlik M., Stankiewicz W., Glema A., Łodygowski T., Wierszycki M.: *The Interaction of the L4-L5 spinal segments by FEM analysis. Part 1. Geometrical data* acquisition and validation. 13th Conference of the Society of Biomechanics, pp.98. Wrocław, 2002.
- [3] RychlikM.: Sposoby uzyskiwania i przetwarzania geometrii złożonych obiektów 3D, ZNPP, Nr 53: 53-58. Poznań, 2001.
- [4] Edelbrunner H., Mucke E.P.: *Three Dimensional Alpha Shape*, ACM Transaction on Graphics, Vol. 13, n.1, 1994, s. 43–72.
- [5] Lorensen W., Cline H., Marching Cube: *A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm*, Computer Graphics, 1987, Vol. 21 n. 4, 2000, s. 163–170.
- [6] Kobbelt L., Botsch M.: An interactive approach to point cloud triangulation, Eurographics, Vol. 19 n. 3, 2000.
- [7] Boissonnat J.-D., Geiger B.: *Three-dimensional reconstruction of complex shapes based on the Delaunay triangulation*, Report 1697, INRIA Sophia Antipolis, Valbonne, France, 1992.
- [8] Boissonnat J.-D., Geiger B.: Three-dimensional reconstruction of complex shapes based on the Delaunay triangulation, Biomedical Image Processing and Biomedical Visualization, San Jose CA, Vol. 1905, part 2, 1993, s. 964–975.
- [9] Boissonnat J.-D.: *Shape reconstruction from planar cross-sections*, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 44, 1988, pp. 1–29.
- [10] Geiger B.: *Three-dimensional modeling of human organs and its application to diagnosis and surgical planning*, Report 06902, INRIA Sophia – Antipolis, France, 1993.
- [11] Benameur S., Mignotte M., Parent S., Labelle H., Skalli W., De Guise J. A.: 3D Biplanar Reconstruction of Scoliotic Vertebrae Using Statistical Models, 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. II-577-582, 8-14 december 2001.
- [12] Sirovich L.: Turbulence and the Dynamics of Coherent Structure: I, II and III, Quarterly Applied Mathematics, 45, pp. 561, 1987.

### Mgr inż. Michał RYCHLIK

Politechnika Poznańska Instytut Silników Spalinowych i Transportu Zakład Metod Projektowania Maszyn ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: (061) 665-21-67 e-mail:rychlik@stanton..ice.put.poznan.pl

## WPŁYW PARAMETRÓW GEOMETRYCZNYCH ROWKA WYPŁYWKI NA EFEKTYWNOŚĆ PROCESU KUCIA

## INFLUENCE OF THE GEOMETRIC FLASH PARAMETERS ON DIE FORGING EFFICIENCY

Artykuł przedstawia wyniki przeprowadzonej analizy wpływu wybranych parametrów geometrycznych rowka na wypływkę na efektywność procesu kucia w matrycach otwartych. W analizie zastosowano specjalny model procesu kucia poprzez wyciskanie, w którym powstaje czop o powierzchni swobodnej. Obliczenia numeryczne wykonano stosując autorską metodę sekwencyjnej symulacji kucia matrycowego, bazującą na metodzie linii poślizgu i charakterystyk.

Slowa kluczowe: kucie matrycowe, rowek na wypływkę, sekwencyjna technika analizy.

The article presents the selected results of an influence of the geometrical flash land parameters on die-closed forging efficiency. The theoretical analysis was made in the author's computer program ForgeSLF, which bases on Slip Line Field Elemental Technique (SLFET). As a tools were used the closed-dies with a flat parallel and wedged flash land. It assured extrusion process (parts with the boss) in plane strain conditions.

Keywords: closed-die forging, flash gap, slip-line field elemental technique.

### 1. Wstęp

Kucie w matrycach otwartych jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych technologii wykonywania odkuwek. Świadczą o tym statystyki, według których obecnie około 68% wyrobów kuźniczych jest wykonanych tą technologią [1, 2]. Cechą charakterystyczną omawianego sposobu plastycznego kształtowania odkuwek jest to, że nadmiar materiału jest wypychany na zewnątrz wykroju matrycującego, tworząc wypływkę. Poza gromadzeniem materiału, rowek na wypływkę spełnia inne zadania mające istotne znaczenie dla tej technologii (m. in. zapewnienie wypełnienia wykroju matrycującego, co jest realizowane poprzez odpowiedni dobór parametrów geometrycznych rowka) [1, 3, 4].

Powszechnym trendem, obserwowanym w przemyśle, jest projektowanie procesów technologicznych, które charakteryzują się jak najwyższą efektywnością. W przypadku obróbki plastycznej metali, za efektywny proces (np. kucia matrycowego) uważa się taki, w którym wykrój roboczy jest właściwie wypełniony materiałem, natomiast straty materiałowe są możliwie najmniejsze. Również pożądane jest, aby wartość siły kształtowania była najmniejsza lub nie przekraczała niebezpiecznej granicy (np. wywołującej uszkodzenie narzędzi, maszyn itp.). Jednym ze sposobów decydowania o efektywności procesu kucia jest dobór jego parametrów geometrycznych rowka na wypływkę [4, 5]. Obecnie, zarówno w kuźniach europejskich, jak i polskich, powszechnie są stosowane tzw. rowki o kształcie tradycyjnym (rys. 1). Dobierane są one na podstawie zaleceń projektowych, które opracowano jeszcze na początku drugiej połowy ubiegłego wieku. W warunkach przemysłowych próbowano stosować również rowki o innych kształtach. Na rys. 1d. przedstawiono rowek Richerta (tzw. klinowy). Jedne z pierwszych prób użycia rowka o takim kształcie w procesach kucia wykonano w latach osiemdziesiątych XX wieku w Kuźni Matrycowej FS w Lublinie. Jednakże, obecnie jest on stosowany sporadycznie. Analiza literatury specjalistycznej wykazała, że brak jest jakichkolwiek informacji o zasadach doboru rowka o kształcie klinowym [1, 3, 5, 6].

Na podstawie danych statystycznych, szacuje się, że ilość odpadu powstającego w warunkach przemysłowych w wyniku stosowania rowków o kształcie tradycyjnym wynosi około 20% masy odkuwki. Z kolei koszty materiałowe stanowią 50 ÷ 60% całkowitego kosztu wyprodukowania jednej odkuwki. Drugim istotnym czynnikiem decydującym o cenie odkuwki jest zużywana energia – uważa się, że koszty energii przekraczają 10% całkowitych kosztów. Zważywszy, że roczna produkcja światowych kuźni wynosi ponad 1,5 miliona ton odkuwek, łatwo można obliczyć straty, jakie wynikają bezpośrednio z powstawania wypływki [1, 2]. Z kolei, obecny stan wiedzy dotyczący zasad doboru parametrów geometrycznych rowka na wy-



Rys. 1. Schemat procesu kucia matrycowego (a) oraz kształty rowków na wypływkę stosowanych w przemyśle: tradycyjny używany przy kuciu na młotach (b) i na prasach (c) oraz rowek Richerta (d); oznaczenia zgodne z treścią

Fig. 1. The scheme of closed-die forging (a) and shapes of the flash gap use in the industry: with parallel land uses in forging on hummer (b) and on press (c) and the Richert's flash gap (d); description in the text

pływkę jest niepełny [1, 3]. Przytoczone fakty w pełni uzasadniają konieczność prowadzenia badań naukowych, mających na celu uzupełnienie wiedzy oraz znalezienie rozwiązań, które zwiększą efektywność tej technologii. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy wpływu wybranych parametrów rowka na wypływkę, o kształcie tradycyjnym i klinowym, na stopień wypełnienia wykroju matrycującego oraz na siłę kształtowania.

### 2. Analiza teoretyczna

#### 2.1. Model oraz metoda badań procesu kucia

Model analizowanego procesu kucia matrycowego przedstawiono na rys. 1. Pozwala on na realizację kształtowania poprzez wyciskanie, w którym powstaje czop o powierzchni swobodnej. Wartość wysokości czopa h<sub>c</sub> "spełnia funkcję" parametru określającego stopień wypełnienia wykroju. Ponadto założono, że kształtowanie odkuwki przebiega w warunkach płaskiego stanu odkształcenia, a materiał jest jednorodny, izotropowy i idealnie plastyczny. Są to założenia upraszczające, jednakże analizując dane dotyczące warunków panujących podczas kucia wyrobów stalowych z osią wydłużoną na gorąco, można z pewnym przybliżeniem uznać, iż omawiany model zadawalająco modeluje wspomnianą grupę obiektów rzeczywistych [5, 6, 7, 8].

Badania teoretyczne oparte są na autorskiej metodzie sekwencyjnej techniki analizy procesu kucia, która bazuje na inżynierskiej metodzie linii poślizgu i charakterystyk. W celu umożliwienia prowadzenia symulacji przy zmiennych parametrach procesu kształtowania, został napisany program komputerowy o nazwie ForgeSLF (implementacja omawianej metody). Na rys. 2. przedstawiono schemat blokowy opracowanej aplikacji. Generalnie, metoda ta polega na podziale procesu kształtowania na określoną ilość etapów, które z osobna są analizowane metodą linii poślizgu. Uzyskane wyniki (tj. siła kształtowania, rozkład naprężenia i prędkości przemieszczeń metalu) są wykorzystywane do zdefiniowania nowego kształtu odkuwki w kolejnej sekwencji symulacji. Szerzej metoda ta została opisana w opracowaniach [1, 3, 5, 6].

#### 2.2. Analiza procesu kucia

Analizę procesu kucia matrycowego wg schematu (rys. 1) przeprowadzono przy założeniach, że: szerokość wykroju matrycującego d = 43 mm, początkowa wysokość przedkuwki H = 30 mm oraz szerokość czopa u podstawy b<sub>c</sub> = 15 mm. Proces przeprowadzano tak, aby uzyskać odkuwkę o wysokości (nie licząc czopa) H<sub>o</sub> = 19,5 mm. Ponadto założono, że pochylenia kuźnicze ścianek wykroju wynoszą 5,5°, grubość pasma odkuwki wynosi 100 mm oraz granica plastyczności odkształcanego materiału równa jest 19 MPa (określona na podstawie krzywych płynięcia ołowiu gatunku Pb1 [4]).

Rozpatrywany w obliczeniach obszar zmiennych decyzyjnych (tj. wysokość h, szerokość b i pochylenie mostka rowka na wypływkę  $\theta$  - rys. 1) określono na podstawie reguł projektowych, które są podane w opracowaniach np.: [9, 10]. Zakres tego obszaru oraz przykładowe wartości parametrów rowka na wypływkę, wyznaczone na podstawie reguł projektowych innych autorów, przedstawiono w tabeli 1.

Należy również podkreślić, że obliczenia wykonywano przyjmując ograniczenie wartości stosunku b/h, który musi zawierać się w przedziale  $1,75 \div 12$ . Wynika to z dostosowania wartości stosunku b/h do zakresu stosowanego w przemyśle [9, 10].



*Rys. 2. Schemat blokowy programu ForgeSLF Fig. 2. Flowchart of the ForgeSLF application* 

Tab. 1.	Wartości parametrów	rowka na wyp	ływkę oraz pro	opozycje innych	autorów [1,	9,	10].
	1	~ 1	<i>· · · ·</i>	1 2 2 2	L (	-	

	min.	max.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
b [mm]	2	9	4÷5	6	5,27	2,45	6,63	6,65
h [mm]	0,5	2,5	1÷1,5	0,8	1,45	0,8	0,69	2,22
θ /°]	0	8	0	0	0	0	0	0
(1) wg INO	P-Z/135-06-7	'8 (kucie na p	rasach)		(4) wg Vieregge'a			
(2) wg INOP-Z/135-06-78 (kucie na młotach)					(5) wg Voigtlander'a			
(3) wg Tichl	kiewitch'a			(6) wg Neul	perger'a i Mo	ckel'a		



*Rys. 3. Zależność siły kucia F od parametrów geometrycznych rowka na wypływkę Fig. 3. The relationship between forging force F and geometrical parameters of the flash land* 

### 2.3. Wyniki analizy

Wyniki przeprowadzonych obliczeń przedstawiono na rys. 3., rys. 4. i rys. 5. Obrazują one odpowiednio zależność pomiędzy siłą kształtowania F, wysokością czopa  $h_c$  oraz stosunkiem objętości wypływki do objętości odkuwki (w ujęciu procentowym) a szerokością b i wysokością h mostka rowka na wypływkę, dla trzech wybranych wartości pochylenia mostka  $\theta$  – tj.  $\theta = 0^{\circ}$  (rowek tradycyjny) oraz  $\theta = 4^{\circ}$  i 8° (rowek klinowy). Natomiast, porównanie wartości wynikowych

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
F [kN]	341,66 ÷ 404,35	462,75	384,17	330,87	501,60	380,06	
h <sub>c</sub> [mm]	18,50 ÷ 21,18	23,08	20,14	18,22	24,26	19,40	
V <sub>w</sub> /V <sub>o</sub> [%]	13,32 ÷ 16,51	11,25	14,53	16,90	10,03	15,42	
(1) - (6) - tak samo jak w tabeli 1.							

Tab. 2. Zestawienie wyników dla poszczególnych zestawów parametrów rowka na wypływkę



*Rys. 4. Zależność wysokości czopa*  $h_c$  *od parametrów geometrycznych rowka ma wypływkę Fig. 4. The relationship between boss height*  $h_c$  *and geometrical parameters of the flash land* 



- Rys. 5. Zależność stosunku objętości wypływki do objętości całkowitej odkuwki od parametrów geometrycznych rowka na wypływkę
- *Fig. 5. The relationship between the volume of flash to total volume of billet ratio and geometrical parameters of the flash land*

dla przykładowych parametrów rowka na wypływkę (zgodnie z tabelą 1.) umieszczono w tabeli 2.

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że stosując rowek klinowy uzyskuje się coraz mniejszą siłę kształtowania. Jednakże odbywa się to kosztem zmniejszenia wysokości wyciśniętego czopa, co uważa się za niepożądane, gdyż jest to jednoznaczne ze zwiększeniem objętości wypływki (odpadu).

#### 3. Podsumowanie

W opracowaniu przedstawiono rezultaty analizy wpływu parametrów rowka na wypływkę na efektywność procesu kucia matrycowego. Badania teoretyczne przeprowadzone zostały przy użyciu autorskiego programu ForgeSLF – implementacji, również autorskiej, metody sekwencyjnej techniki symulacji kucia, która bazuje na inżynierskiej metodzie linii poślizgu. Uzyskane wyniki potwierdzają m. in. przydatność tej nowatorskiej metody do numerycznego modelowania procesu kucia.

Szczególną uwagę należy zwrócić na rezultaty obliczeń dla parametrów rowka na wypływkę, które polecane są przez zalecenia branżowe [10] (tab.

### 4. Literatura

- [1] Samołyk G.: Nowa technika symulacji procesu kucia matrycowego. Przegląd Mechaniczny 12 (2003) s. 32-34
- [2] Zimpel J.: Przemysł kuźniczy w Niemczech. Obróbka Plastyczna Metali 2003 nr 3 s. 43-47
- [3] Samołyk G., Pater Z.: *Application of the slip-line field method to the analysis of die cavity filling*. International Conference on Advanced in materials and Processing Technologies. AMPT 2003, Dublin City University, Ireland 2003, s. 1114-1117
- [4] Pater Z., Gontarz A., Weroński W.: Obróbka plastyczna. Obliczanie sił kształtowania. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2002.
- [5] Samołyk G.: Sekwencyjna technika analizy procesu kucia matrycowego oparta na metodzie linii poślizgu i charakterystyk. IV Międzynarodowa Sesja Naukowa. Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, s. 191-195, 2003.
- [6] Samołyk G.: Dobór wysokości rowka wypływki na etapie projektowania procesu kucia matrycowego. IV Międzynarodowa Sesja Naukowa. Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Politechnika Częstochowska, Częstochowa, s. 196-200, 2003.
- [7] Pater Z., Weroński W.: Wpływ kształtu rowka wypływki na wypełnienie wykroju w procesie kucia matrycowego. Naučno-Techničeskij i Proizbodstvennyj Žurnal. Metallyrgičeskaja i Gophopydnaja Promishlennost. Dniepropietrovsk 2002 s. 490-493
- [8] Pater Z.: Wpływ kształtu rowka wypływki na przebieg procesu kucia matrycowego. Obróbka Plastyczna Metali nr 1 s. 31-42, 1996.
- [9] Sleeckx E., Kruth J.P.: Review of flash design rules for closed-die forgings. Journal of Materials Processing Technology 1992 vol. 31 s. 119-134
- [10] INOP-Z/135-06-78: Kucie matrycowe. Rowki na wypływkę

### Mgr inż. Grzegorz SAMOŁYK

Katedra Komputerowego Modelowania i Technologii Obróbki Plastycznej Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin e-mail: g.samolyk@pollub.pl

1 itab.2 – zestaw nr 1 i nr 2). Potwierdzają one

słuszność stosowania w warunkach przemysłowych

rowka tradycyjnego o właśnie takich wymiarach. Na-

leży również wspomnieć, że kwestia poszukiwania

lepszych rozwiązań jest wciąż otwarta.

## KOMPLEKSOWA OCENA JAKOŚCI ŻELIWA SFEROIDALNEGO

### EVALUATION COMPLEX OF QUALITY FOR NODULAR CAST IRON

W pracy przedstawiono ocenę jakości żeliwa sferoidalnego w oparciu o przeprowadzone badania kompleksowe dwóch gatunków żeliw. Przedstawiono równania regresji do oceny jakości żeliwa sferoidalnego gatunku ZsCu1. Opracowano je na podstawie charakterystycznych punktów krzywych ATD. Do opisu kształtu wydzieleń grafitu zastosowano współczynnik kształtu C.

*Słowa kluczowe:* żeliwo sferoidalne, analiza termiczno derywacyjna, grafit sferoidalny, współczynnik kształtu

The paper presented equations of regression for evaluation of graphite shape in nodular cast iron. They were prepared with the use of characteristic points of TDA curves. The factor shape C was used to describe the nodular cast iron.

*Keywords:* ductile cast iron, thermal derivative analysis, nodular graphite, factor shape

### 1. Wstęp

Żeliwo sferoidalne jest tworzywem odlewniczym o bardzo szerokim zastosowaniu. Wynika to z bardzo dużego zróżnicowania właściwości mechanicznych w zależności od liczby i wielkości wydzieleń grafitu, jak również od rodzaju osnowy. Dlatego w ostatnim dziesięcioleciu produkcja odlewów z żeliwa sferoidalnego wykazywała tendencje wzrostowe. Jego całkowity wzrost wyniósł ok. 40%, z jednoczesnym spadkiem produkcji odlewów z pozostałych stopów żelaza, dla żeliwa szarego i stopowego spadek ten wyniósł ok. 13%, dla odlewów z żeliwa ciągliwego spadek wynosił ok. 26% i odlewów staliwnych ok. 25% [1].

Wraz ze wzrostem produkcji odlewów z żeliwa sferoidalnego powstał problem skutecznego i szybkiego sposobu oceny jakości tego żeliwa. W poniższej pracy przedstawiono kompleksową ocenę jakości żeliwa sferoidalnego w oparciu metodę ATD i komputerową analizę kształtu wydzieleń grafitu.

Problem oceny jakości żeliwa sprowadza się do oceny jakości metalu w kadzi przed zalaniem form. Takie podejście do zagadnienia ma na celu zmniejszenie odlewów wadliwych, przez wyeliminowanie przypadkowości z produkcji. Do oceny jakości żeliwa, a w szczególności kształtu wydzieleń grafitu, wielkości oraz ilości wydzieleń idealnie nadaje się metoda analizy termiczno derywacyjnej. Pozwala ona na szybką i skuteczną ocenę jakości ciekłego metalu, w powiązaniu z innymi danymi daje pełen obraz jakości żeliwa.

#### 2. Przebieg i wyniki badań

Badania przeprowadzono na dwóch gatunkach żeliwa sferoidalnego (EN-GJS 400-15 i ZsCu1,0). Przeprowadzono 19 wytopów żeliwa gatunku EN-GJS 400-15, oraz 16 wytopów żeliwa gatunku ZsCu1,0. Ideowy schemat przeprowadzonych badań przedstawiono na rysunku 1.

Pierwszym etapem badań było określenie składu chemicznego żeliwa wyjściowego, oraz zarejestrowanie krzywej chłodzenia, na podstawie której wyznaczono wartości pierwszej i drugiej pochodnej. Jeżeli skład chemiczny żeliwa wyjściowego był odpowiedni, następował proces sferoidyzacji i modyfikacji.

Następnym etapem była analiza składu chemicznego, oraz rejestracja krzywej chłodzenia żeliwa sferoidalnego. Podobnie jak w poprzednim przypadku na podstawie krzywej chłodzenia została obliczona pierwsza i druga pochodna i wyznaczone punkty charakterystyczne, których wartości zostały umieszczone w macierzy danych. Do rejestracji krzywych ATD zastosowano aparaturę Crystaldigraph wraz z oprogramowaniem [2, 6]. Następnie zostały przeprowadzone badania wytrzymałościowe wg PN-EN 1563.

Dokonano również analizy kształtu wydzieleń grafitu przy pomocy komputerowego analizatora obrazu. Następnie próbki zostały wytrawione w celu przeprowadzenia analizy procentowego udziału poszczególnych składników struktury. Badania wszystkich wytopów zostały przeprowadzone według powyższego schematu i wyniki badań zostały umieszczone w macierzy danych.

W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny żeliwa wyjściowego oraz sferoidalnego.



Rys. 1. Kontrola procesu produkcji żeliwa sferoidalnego Fig. 1. Process of control for produce Ductile Cast Iron

Właściwości mechaniczne żeliwa sferoidalnego: Rm=728 MPa,  $A_5$ =1,8%, HB=341 (próbka nr 683b).

Krzywa termiczna T = f(t) i krzywa derywacyjna T' = dT/dt = f'(t) zarejestrowane podczas krzepnięcia metalu w próbniku zostały poddane analizie wg schematu przedstawionego na rysunku 2. Analiza ta polegała na określeniu punktów charakterystycznych znajdujących się na krzywych. Krzywa oznaczona nr 1 odnosi się do żeliwa sferoidalnego, a nr 2 to przebieg chłodzenia żeliwa szarego. Analogicznie zostały oznaczone krzywe derywacyjne, odpowiednio 1' i 2'.

Do opisu kształtu wydzieleń grafitu zastosowano współczynnik kształtu C [3]. Dokonano pomiarów następujących charakterystycznych parametrów: pole powierzchni wydzielenia grafitu BD, obwód wydzielenia BP, procentowego udziału powierzchni grafitu G. Powyższe wielkości zostały wykorzystane przy sporządzaniu histogramów: (ilość "N<sub>a</sub>" i objętość "V<sub>v</sub>" wydzieleń grafitu w funkcji współczynnika kształtu "C" oraz ilość "N<sub>a</sub>" i objętość "V<sub>v</sub>" w funkcji pola powierzchni BD)

Przyjęto, że bardzo dobre żeliwo sferoidalne będzie charakteryzowało się współczynnikiem kształtu 0,9<C<1, natomiast żeliwo wermikularne powinno posiadać współczynnik kształtu 0,66<C<0,9. Na podstawie wykonanych badań opracowano histogramy, których przykłady przedstawiono poniżej.

#### 3. Analiza statystyczna uzyskanych wyników

Wszystkie wytopy zostały przebadane w sposób zaprezentowany w rozdziale 2, a wyniki badań umieszczono w dwóch macierzach danych (macierz dla żeliwa gatunku EN-GJS 400-15 i macierz dla żeliwa gatunku ZsCu1.0). W oparciu o uzyskane dane stosując metodę regresji krokowej opracowano zależności statystyczne. Poniżej przedstawiono przykładowe równania statystyczne dla żeliwa gatunku ZsCu1.0.

$$N_{a(0.9)}\% = -12371,5 + 11,61 \cdot T_1 + 0,26 \cdot T_M$$

Gdzie:  $T_1$  – temperatura w punkcie I,  $T_M$  – temperatura w punkcie M,

O parametrach statystycznych:

- wartość średnia  $Na_s = 47,28 \%$ ,
- odchylenie standardowe Na = 5,16 %,
- współczynnik korelacji R = 0,89,
- test F = 12,49.

Na podstawie uzyskanego równania (1) można zauważyć, że ilość wydzieleń grafitu o najbardziej pożądanym kształcie (współczynnik kształtu C=0,9÷1) opisana jest przez charakterystyczne temperatury stanu stałego żeliwa. Wraz ze wzrostem wartości tych temperatur zwiększa się ilość wydzieleń grafitu klasy C=0,9÷1. Kulisty kształt wydzielenia charakteryzuje się mniejszym współczynnikiem przewodności cieplnej w porównaniu z grafitem płatkowym w żeliwie szarym. Różnice w przewodności cieplnej związane są z występowaniem odizolowanych wydzieleń grafitu sferoidalnego co wpływa na zmniejszenie przewodności cieplnej badanego żeliwa [4, 5].

$$N_{a(0.8)} \% = 664, 7 - 1, 13 \cdot T_{D} + 0, 77 \cdot T_{M}$$

Gdzie:  $T_D$  – temperatura w punkcie D,  $T_M$  – temperatura w punkcie M,

Tab.	1.	Skład	chemiczny	żeliwa
------	----	-------	-----------	--------

```
Tab. 1. Chemical composition of cast iron
```

Żeliwo wyjściowe próbka nr 683a								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu		
%	%	%	%	%	%	%	-	
3,51	0,54	1,98	0,049	0,029	0,07	0,49	-	
Żeliwo sfer	Żeliwo sferoidalne próbka nr 683b							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Cu	Mg	
%	%	%	%	%	%	%	%	
3,54	0,53	2,73	0,049	0,006	0,07	1,26	0,06	



Rys. 2. Krzywe ATD żeliwa sferoidalnego (1) i (1') i szarego (2) i (2') Fig. 2. TDA curves of Ductile Cast Iron and gray cast iron



Współczynnik kształtu powierzchni "C"

Rys. 3. Ilość wydzieleń grafitu "N<sub>a</sub>" w funkcji współczynnika kształtu "C"

Fig. 3. Numbers of graphite separations ", $N_a$ " in function of ", C" coefficient



- Rys. 5. Ilość wydzieleń grafitu " $N_a$ " w funkcji pola powierzchni BD
- Fig. 5. Numbers of graphite separations ,,  $N_a$  " in function of area ,, BD"

O parametrach statystycznych:

 $Na_s = 74,46$  %; Na = 4,8 %; R = 0,85; F = 9,3.

Wraz z obniżeniem temperatury  $T_D$  (wzrostem przechłodzenia) zwiększa się ilość wydzieleń grafitu klasy C=0,8÷1. Ilość wydzieleń grafitu w tym przypadku opisana jest również przez charakterystyczną temperaturę stanu stałego żeliwa  $T_M$ . Podobnie jak w przypadku poprzednim decydujące znaczenie odgrywa tu zmniejszenie współczynnika przewodności cieplnej żeliwa sferoidalnego [5].



- Rys. 4. Objętość wydzieleń grafitu "V<sub>v</sub>" w funkcji współczynnika kształtu "C"
- Fig. 4. Volume of graphite separations ,,  $V_V$  in function of ,, C" coefficient



- *Rys. 6. Objętość wydzieleń grafitu "V\_v" w funkcji pola powierzchni BD*
- Fig. 6. Volume of graphite separations ,,  $V_V$  in function of area ,,BD"

$$V_{V(0,0)} \% = 1650, 56 - 2,05 \cdot T_{D} + 0,8 \cdot T_{M}$$

Gdzie:  $T_D$  – temperatura w punkcie D,  $T_M$  – temperatura w punkcie M,

O parametrach statystycznych:

$$V_v = 41,3$$
 %;  $Vv = 2,77$  %;  $R = 0,98$ ;  $F = 89,03$ .

Objętość wydzieleń grafitu (klasy C=0,9÷1) podobnie jak w poprzednim przypadku zależy od wartości przechłodzenia  $T_D$  i od temperatury  $T_M$  opisującej stan stały żeliwa [5].



Rys. 7. Sferoidy grafitu, zglad nie trawiony Fig. 7. Graphite spheroids, microsection unetched

 $V_{V(0,8)} \% = 1045,91 - 1,47 \cdot T_D + 0,77 \cdot T_K - 0,38 \cdot t_F$ 

Gdzie:  $T_D$  – temperatura w punkcie D,  $T_K$  – temperatura w punkcie K,  $t_F$  – czas krystalizacji stabilnej eutektyki

O parametrach statystycznych:

 $V_v = 74$  %; Vv = 3,41 %; R = 0,93; F = 12,14.

Objętość wydzieleń grafitu (klasy C=0,8÷1) zależy od wielkości przechłodzenia  $T_D^i$  od temperatury  $T_K^k$ opisującej stan stały żeliwa, ponadto w równaniu (4) obserwujemy wpływ czasu końca krystalizacji eutektyki grafitowej, wraz ze skróceniem czasu  $t_F^k$  zwiększa się ilość wydzieleń grafitu klasy 0,8 – 1. Wydłużenie czasu  $t_F^k$  powoduje krystalizację grafitu sferoidalnego w zdegenerowanej postaci [5].



Rys. 8. Struktura żeliwa sferoidalnego, trawiona Fig. 8. Structure of Ductile Iron, etched 3% Nital

#### 4. Podsumowanie

Zaprezentowany sposób kompleksowej oceny jakości żeliwa sferoidalnego jest w pełni miarodajny ze względu na ilość przeprowadzonych wytopów.

Uzyskane zależności statystyczne cechują się wysokimi parametrami statystycznymi i mogą być pomocne przy kontroli jakości żeliwa sferoidalnego w oparciu o metodę ATD.

Zaprezentowane równania statystyczne odnoszą się do oceny jakości żeliwa na podstawie charakterystycznych punktów ATD. Zebrany zbiór danych pozwala na sporządzenie innych zależności statystycznych, nad którymi obecnie trwa praca. Uzyskane wyniki badań powinny znaleźć zastosowanie w warunkach przemysłowych, w celu zwiększenia efektywności oceny jakości żeliwa, zgodnie z zakładanym celem przeprowadzonych badań.

### 5. Literatura

- [1] Tybulczuk J., Martynowicz Lis K.: *Stan aktualny i prognozy rozwoju żeliwa sferoidalnego*, Seminarium pt. "Wiodące gatunki i technologie żeliwa sferoidalnego dziś i jutro" Instytut Odlewnictwa, , str. 21, 2002.
- [2] Stawarz.M., Szajnar J.: Ocena jakości żeliwa sferoidalnego metodą ATD, Archiwum Odlewnictwa, Nr 10, str. 199 – 206, Kraków, Rocznik 3, 2003.
- Jura S. i inni: Zastosowanie metody ATD do oceny jakości żeliwa sferoidalnego, Archiwum Odlewnictwa nr 1 (1/2), str. 93-102, 2001.
- [4] Podrzucki C.: Żeliwo struktura właściwości zastosowanie, tom 1 STOP Kraków, s.207, 1991.
- [5] Stawarz M.: Ocena kształtu grafitu w żeliwie sferoidalnym gatunku ZsCu1.0 w oparciu o metodę ATD, DOKSEM 2003, Rajeckie Teplice, str. 66-67, 11–12 November 2003.
- [6] Stawarz M., Szajnar J.: Ocena kształtu wydzieleń grafitu w żeliwie sferoidalnym metodą ATD, 12<sup>th</sup> International Scientific Conference AMME, Gliwice-Zakopane 7-10 December, str. 832, 2003.

### Mgr inż. Marcin STAWARZ

Zakład Odlewnictwa Ins. Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechnika Śląska ul. Towarowa 7, 44 – 100 Gliwice tel. (032) 231 60 31

## WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA PRZEDKUWEK DESIGN PROCESS FOR DIE FORGING FOR IDEAL PREFORMS

W pracy tej przedstawiłem aplikacje wspomagającą proces projektowania przedkuwek idealnych. Program wykorzystuje interfejs OLE zaimplementowany w aplikacji komercyjnej "Solid Works 2000". Program w znacznym stopniu ułatwia i przyspiesz proces projektowania przedkuwek jednocześnie podaje charakterystyczne wartości. Aplikacja jest przydatna dla analizy idealnych przedkuwek z osią wydłużoną.

Słowa kluczowe: proces projektowania przedkuwek, analiza przedkuwek

In this work is presented an own application, supporting the design process for die forging for ideal preforms. The program is using the automatic OLE interface and is an add on for commercial application "Solid Works 2000". Its usage allows less complicated and quick ideal preforms designing and at the same time maintaining very precise volume measurable characteristic. This application is particularly useful for analyzing ideal preforms with extended axis

Keywords: design process for die forging, analyzing preforms

### 1. Wstęp

Odkuwka jest półwyrobem lub wyrobem wykonanym technologią kucia. Charakteryzuje się ona wieloma zaletami: wymiary odkuwki minimalnie różnią się od wymiarów gotowego wyrobu. Koszt jednostkowy w produkcji seryjnej jest zwykle niższy niż odlewu lub części wykonanej przez skrawanie, a właściwości mechaniczne odkuwek są zwykle korzystniejsze. Projekt odkuwki opracowuje się na podstawie rysunku wykonawczego części. Przystępując do opracowania odkuwki należy ustalić: naddatki na obróbkę skrawaniem, skosy matrycowe, promienie zaokrągleń, kształty i wymiary denek oraz inne specjalne warunki wykonania. Następnie wyznacza się ilość etapów kucia, która zależy głównie od stopnia skomplikowania części oraz kształtów przedkuwki dla każdego etapu.

Wielkość naddatków na obróbkę skrawaniem zależy przede wszystkim od kształtu i wymiarów odkuwki, gatunku materiału wyjściowego, stanu maszyny, dokładności wykonania i ustawienia oprzyrządowania, jakości powierzchni materiału wyjściowego, sposobu nagrzewania materiału itp. Wielkość naddatku na obróbkę skrawaniem, dla odkuwek matrycowych kutych na młotach, waha się w zakresie 1,5÷7 mm. Polska Norma PN-64/H-94301 przewiduje minimalne wielkości naddatków zależne od klasy dokładności i wielkości odkuwki. Podane naddatki są funkcją wymiarów maksymalnych, takich jak: szerokość b lub średnica d oraz wysokość h lub długość 1. Podane wartości dotyczą dwustronnej obróbki skrawaniem.

W przypadku jednostronnej obróbki przyjmuje się naddatki o połowe mniejsze. Jeżeli długość odkuwki jest trzykrotnie większa od największej szerokości b lub średnicy d, naddatki na obróbkę na długości należy przyjmować 1,5-2 razy większe. Mając na uwadze wyżej wymienione uwarunkowania proces projektowania jest pracochłonny oraz wymaga wykonywania wielu zadań geometrycznych i obliczeniowych. Istotne znaczenie mają działania geometryczne, bowiem każdy etap kucia zmienia wymiary i kształt obiektu. Zwykle bazuje się na rysunkach płaskich z wykorzystaniem planimetrii. W celu uzyskania większej dokładności, w pracy zaproponowano zastosowanie modelowania bryłowego. W tym celu dokonywano podziału przedkuwki na bryły elementarne o małej, skończonej objętości.

### 2. Idealna przedkuwka

Odkuwki matrycowe o prostych kształtach wykonuje się bezpośrednio z odcinków prętów, kęsów itd., natomiast te o złożonych kształtach wykonuje się z przedkuwek. W produkcji seryjnej i masowej stosuje się przedkuwki wstępnie matrycowane lub otrzymane w procesie walcowania periodycznego – najczęściej kuźniczego. W celu uzyskania jak najlepszych efektów ekonomicznych, to jest wysokiej wydajności, jakości odkuwek oraz jak najmniejszego zużycia materiału wyjściowego, przedkuwki przeznaczone do wykonania odkuwek matrycowych powinny mieć kształt jak najbardziej zbliżony do zarysu odkuwki w płaszczyźnie podziału, a poszczególne pola powierzchni przekrojów poprzecznych przedkuwki powinny być równe sumie odpowiednich pól powierzchni przekrojów odkuwki i wypływki. Za idealną przedkuwkę lub idealną odkuwkę wstępną uważa się bryłę obrotową mającą pola przekrojów poprzecznych równe sumie odpowiednich pól odkuwki i wypływki. Na podstawie idealnej przedkuwki opracowuje się proces technologiczny (dobiera się rodzaj i liczbę zabiegów), określa wymiary materiału wyjściowego i projektuje wykroje pomocnicze.

Tok postępowania przy konstruowaniu idealnej odkuwki wstępnej z osią wzdłużną jest następujący [2]. Najpierw kreśli się rysunek odkuwki oraz wprowadza układ współrzędnych o osiach l i d (rys. 1 i rys. 2). Następnie określa się charakterystyczne wielkości odkuwki: obwód O w płaszczyźnie rzutu (płaszczyzna prostopadła do kierunku uderzenia młota), pole S zarysu odkuwki w płaszczyźnie rzutu i objętość V<sub>od</sub> odkuwki. W kolejnych krokach wyznacza się wielkości wypływki: grubość h, objętość V<sub>r</sub>, pole przekroju rowka na wypływkę S<sub>r</sub> oraz charakterystyczne przekroje S<sub>n</sub> odkuwki, w których następuje zmiana jej kształtu (rys. 1). Przekroje idealnej przedkuwki S<sub>ip</sub> wyznacza się według wzorów:

– dla przekrojów środkowych:

$$S_{ip} = S_n + 2\varphi \cdot S_r \tag{1}$$

gdzie  $\phi$  - stopień wypełnienia rowka na wypływkę, przyjmuje się równą 0,7;

- dla przekrojów skrajnych:

$$S_{ip} = 2S_r \tag{2}$$

Średnice idealnej przedkuwki  $d_{ip}$  wyznacza się według wzorów:

$$d_{\psi} = 1,13\sqrt{S_{\psi}} \tag{3}$$

Obliczone średnice  $d_{ip}$  odkłada się symetrycznie względem osi l na osi d przyjętego układu współrzędnych. Linia powstała przez połączenie końców średnic  $d_{ip}$  (rys. 2) jest zarysem idealnej przedkuwki.

<sup>\*</sup> Linię wklęsłe idealnej przedkuwki b zamienia się na linie wypukłe a, zachowując przy tym równość objętości:

$$V_1 + V_2 = V_3$$
 (4)



Rys.1. Odkuwka z przekrojami charakterystycznymi oznaczonymi cyframi [2]

Fig.1. Performs with characteristic sections appointed figures [2]

gdzie:  $V_1$ ,  $V_3$  – objętość nad linią a,  $V_2$  – objętość pod linią a,

Średni przekrój  $S_{sr}$  idealnej przedkuwki oblicza się ze wzoru:

$$S_x = \frac{V_{ip}}{I_{ip}} \tag{5}$$

przy czym:

$$V_{ip} = V_{od} + V_r \tag{6}$$

gdzie:  $V_{_{ip}}-$ objętość idealnej przedkuwki,  $l_{_{ip}}-$ długość idealnej przedkuwki równa długości odkuwki.

Średnią średnicę idealnej przedkuwki d<sub>śr</sub> oblicza się ze wzoru:

$$d_{\rm ir} = 1.13\sqrt{S_{\rm ir}} \tag{7}$$

W celu skorygowania wyników uzyskanych za pomocą wzorów (1, 2, 3) sporządza się, w sposób analogiczny jak dla odkuwki, wykres przekrojów idealnej przedkuwki (rys. 3). Po splanimetrowaniu pola tego wykresu sprawdza się objętość idealnej przedkuwki według wzorów:

$$V_{ip} = P \cdot A \tag{8}$$

gdzie: P – podziałka, A – splanimetrowane pole wykresu przekrojów idealnej przedkuwki.

Średni przekrój określony jest wzorem:

$$S_{\rm ir} = f_{\rm ir} \cdot P \tag{9}$$

gdzie: f<sub>śr</sub> – wysokość średniego przekroju; przy czym:

$$\int_{\text{fr}} = \frac{A}{l_{ip}} \tag{10}$$

stąd:

$$S_{\rm ir} = \frac{AP}{l_{\rm ip}} \tag{11}$$

średnicę średniego przekroju obliczamy następująco:

$$d_{\rm tr} = 1,13\sqrt{A_{\rm tr}} = 1,3\sqrt{f_{\rm tr}P}$$
 (12)

Średni przekrój dzieli idealną przedkuwkę na dwie części: trzon i głowę (rys.3). Do trzona należą wszystkie przekroje mniejsze od  $d_{sr}$ , do głowy zaś większe od  $d_{sr}$ .





Fig.3. The graph of sections ideal performs [2]

### 3. Metoda objętościowa

Metoda planimetryczna wykorzystuje płaskie rysunki odkuwek. Przekroje elementów wstępnie dzieli się i przybliża prostokątami. Objętość bryły oblicza się jako sumę elementarnych walców powstałych na podstawie przeprowadzonego podziału.

W pracy, dla zwiększenia dokładności, zaproponowano zbudowanie modelu bryłowego przedkuwki w systemie CAD 3D i na jego podstawie wygenerowanie n elementarnych modeli bryłowych. Po ich wygenerowaniu na nich wykonywane są odpowiednie obliczenia i analizy, analogicznie jak w metodzie planimetrycznej.

Zaproponowaną metodę nazwano objętościową. Jest ona bardziej skomplikowana ale daje się oprogramować. Do tego celu użyteczne są współczesne systemy CAD 3D. Wykonywanie w systemie CAD pojedynczych modeli bryłowych przekrojów powstałych z podziału przedkuwki było by zadaniem pracochłonnym, stąd też zaproponowano napisanie własnej aplikacji wykonującej te elementarne modele bryłowe w sposób zautomatyzowany.

#### 3.1. Algorytm komputerowy

Schemat ideowy opracowanego programu do modelowania przedkuwek pokazano na rys. 4. Program ten zbudowany jest z czterech podstawowych modułów: modułu obsługi interfejsu automatyzacji OLE programu SolidWorks, modułu obliczeniowego, modułu analizy oraz modułu obróbki i prezentacji wyników. Moduł obsługi interfejsu automatyzacji OLE ma za zadanie nawiązanie połączenia z programem SolidWorks i wykonywanie ciągu poleceń przekazywanych przez aplikację nadrzędną. Moduł obliczeniowy realizuje obliczenia: promieni przedkuwki, dobór rowka na wypływkę, wyznaczenie objętości całkowitej, wyliczenie wymiarów materiału wyjściowego. Moduł analizy umożliwia zmiany promienia wybranego elementu, wygładzanie konturu, interaktywne zmiany wszystkich parametrów przedkuwki. Danymi wejściowymi dla modułu obróbki i prezentacji wyników są: tablica objętości elementów wraz z ich promieniami, objętość całkowita oraz wymiary materiału wyjściowego. Na podstawie tej tablicy wyznaczane są wartości następujących parametrów: maksymalnego i minimalnego promienia przedkuwki oraz długość trzonu. Następnie wyliczane są wartości wskaźników a, b, k. Wyznaczone parametry przesyłane są również do programu SolidWorks w celu wygenerowania modelu bryłowego materiału wyjściowego. W module tym obliczany jest również błąd względny nadwyżki objętości.

Napisana aplikacja, przy wykorzystaniu interfejsu automatyzacji OLE, wykonuje w programie SolidWorks, zastępczy model przedkuwki składający się ze skończonej liczby bryłowych modeli elementarnych o długości dx. Suma objętości tych modeli pozwala obliczyć wymiary i kształt przedkuwki. Po wykonaniu każdego modelu elementu program SolidWorks zwraca do aplikacji jego numer i objętość. Na podstawie przekazanych informacji obliczane są dane o zastępczej bryle w postaci walca, to jest dla dx długości przedkuwki obliczany jest elementarny promień r<sub>i</sub>. Cykl ten jest powtarzany aż do przejścia całej przedkuwki.

## 3.2. Przykład modelowania przedkuwki z osią wydłużoną

Modelowanie przedkuwki z wykorzystaniem SolidWorks zostanie przedstawione na przykładzie korbowodu. W pierwszej kolejności wykonano w programie SolidWorks model bryłowy (rys. 5). Następnie uruchomiono program Przedkuwki, który wykorzystując model bryłowy z rys. 5 zbudował model zastępczy składający się z x elementów (rys. 6) o objętościach dV<sub>i</sub>. Na rys. 6 pokazano podział przedkuwki na 9 elementów. Od ilości tych elementów zależy dokład-



Rys.4. Schemat ideowy programu do modelowania przedkuwek Fig.4. The ideological patern of programme to modelling the performs





Rys.5. Odkuwka korbowodu Fig.5. Connecting rod

Rys.6. Element zastępczy Fig.6. Supplementary element



Rys.7. Bryła zbudowana na podstawie wykresu promieni Fig.7. Built on graph of rays clod

ność metody, zatem dla określonej dokładności należy przyjąć odpowiednią ilość elementów. Po zbudowaniu modelu składającego się z wielu elementów poszczególne elementy zastąpiono walcami o równoważnych objętościach i wykonano wykres promieni, w funkcji długości bryły któremu odpowiada bryła pokazana na rys. 7.

Na rys. 8 oraz w tab. 1 pokazano wpływ ilości elementów na błąd względny objętości. Zwiększenie liczby elementów zdecydowanie zmniejsza błąd, jednakże zwiększa się czas obliczeń; niemniej jednak nie są to zbyt długie czasy obliczeniowe.

Na podstawie wstępnych obliczeń zdecydowano się zwiększyć ilość elementów z 9 do 260, w ten sposób względny błąd objętości zmniejszył się do 0,11%, co w tym przypadku jest wystarczające. Następnie obliczono parametry a, b, k dotyczące procesu kucia i przeprowadzono obróbkę uzyskanych danych. Zarys bryły wygładzono przez aproksymację krzywymi trzeciego rzędu, co pokazuje rys. 9. Przy przeprowadzaniu aproksymacji kontrolowano względny błąd objętości.

Po wygenerowaniu zarysu bryły dane zostały przesłane do programu SolidWorks, w którym model przedkuwki został wygenerowany automatycznie. Na rys. 10 pokazano okno programu SolidWorks z wygenerowanym modelem bryłowym przedkuwki. Model ten może być wykorzystany do wykonania rysunku technicznego lub też wygenerowania odpowiedniego kodu numerycznego na obrabiarkę. W podobny sposób można wygenerować model bryłowy dla innych przedkuwek z osią wydłużoną.

Tab. 1. Błąd względny przy generowaniu modelu przedkuwki

dx [mm]	Czas obliczeń [s]	Błąd [%]	Ilość części o długości d
10	14	3,34	26
7,5	18	1,94	35
5	27	1,13	52
2,5	54	0,32	104
1	138	0,11	260



Rys.8. Wykres blędu i czasu obliczeniowego uzależnione od dx Fig.8. The graph of mistake and time computational dependent on from dx



Rys.9 Wygładzanie konturu Fig.9 Polishing contour

#### 4. Podsumowanie

Projektowanie procesu wykonywania odkuwek jest zadaniem złożonym, wymaga prowadzenia odpowiednich obliczeń i określania nowej geometrii na każdym etapie kucia. Prace te należą do uciążliwych, proces ich projektowania jest szczegółowo opisany w[1]. Podjęto zadanie ich automatyzacji przy zastosowaniu technik informatycznych i wiedzy literaturowej. Do zapisu konstrukcji przedkuwki zastosowano program SolidWorks, w którym wykonano parametryczne modele bryłowe. Na każdym etapie procesu projektowania kształt modelowanej bryły zmieniany jest w sposób automatyczny. Zaproponowano auto-

#### 5. Literatura

- [1] Wasiunyk P.: Teoria procesów kucia i prasowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1991.
- [2] Wasiunyk P.: Kucie matrycowe, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1975.
- [3] Reisdorph K.: Delphi 4 dla każdego, Wydawnictwo Helion 1999.
- [4] Pomoc programu Solid Works 2000

### Mgr. inż. Jerzy TURCHAN

Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny Instytut Informatyki Stosowanej Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków e-mail: turo@wp.pl





- Rys. 10. Okno programu SOLIDWORKS z wygenerowanym modelem bryłowym przedkuwki Fig. 10. The window of programme SOLIDWORKS
  - from generated lump model the performs

matyczny podział modelu bryłowego przedkuwki na małe skończone elementy (plastry) przy wykorzystaniu systemu CAD. Do obliczeń naddatków napisano program obliczeniowy, który korzysta z wiedzy znanej z teorii plastyczności. Zagadnienie generowania brył elementarnych zrealizowano wykorzystując programistyczny interfejs automatyzacji programu SolidWorks. Całością procesu projektowania nadzoruje program napisany w środowisku Delphi. Zauważono, że zastosowanie metody objętościowej w miejsce opisanej w literaturze planimetrycznej znacznie zwiększa dokładność uzyskanej przedkuwki. Opracowane oprogramowanie pozwala także znacznie skrócić czas potrzebny na wykonanie projektu.

### STRUKTURA POWŁOK SIO<sub>2</sub> ORAZ SIO<sub>2</sub>-TIO<sub>2</sub> WYTWARZANYCH METODĄ ZOL-ŻEL

### STRUCTURE OF SIO<sub>2</sub> AND SIO<sub>2</sub>-TIO<sub>2</sub> COATINGS PRODUCED BY SOL-GEL METHOD

W pracy przedstawiono rezultaty badań powłok przejściowych krzemionkowych i krzemionkowo – tytanowych na czystym technicznie tytanie oraz jego stopie Ti6Al4VELI. Powłoki SiO<sub>2</sub> i SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> były nanoszone na tytanowe podłoże metodą zol-żel. Do badania składu i morfologii warstwy ceramicznej użyto mikroskopii skaningowej i analizy chemicznej EDX. Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy studiów literatury można stwierdzić, że powłoki zol-żel wykazują dobre połączenie z materiałem podłoża, są jednorodne chemicznie i charakteryzują się stosunkowo dużą chropowatością.

Slowa kluczowe: proces zol-żel, powłoki ceramiczne, tytan, morfologia powłok zol-żel

Results of a study of silica and silica-titania coatings for the creation of intermediate interfaces between commercially-pure Ti or titanium alloy Ti6Al4VELI are presented. Coatings of SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> on base titanium were deposited using sol-gel method. Surface morphology and chemical compositions of the coatings were studied by using scanning electron microscopy with electron diffraction spectroscopy. It is found that: coatings obtained by the sol-gel method are compact, chemically homogeneous and relatively rough.

Keywords: sol-gel process, ceramic coatings, titanium, sol-gel surface morphology.

#### 1. Wprowadzenie

Tytan i jego stopy są atrakcyjnymi biomateriałami stosowanymi w medycynie [1]. Jego korzystne właściwości takie jak: odporność na korozję, niski ciężar właściwy, dobre właściwości mechaniczne i biozgodność sprawiają, że jest on powszechnie stosowany w protetyce dentystycznej [2]. Obecnie są to najpopularniejsze materiały do produkcji implantów, koron i mostów [2-4]. Na rys. 1 przedstawiono potencjalne wykorzystanie tytanowych materiałów.

W wykonawstwie laboratoryjnym metalowych konstrukcji protetycznych z metalu, powierzchnię metalu poddaje się piaskowaniu a następnie licuje się porcelaną. W wyniku tego, pomiędzy ceramiczną porcelaną a metalem, tworzy się warstwa pośrednia, która jest odpowiedzialna za przyczepność porcelany do metalowego podłoża. Jednakże czasami warstwa ta nie wytwarza się w sposób równomierny na całej powierzchni. Wówczas konstrukcja protetyczna posiada niewystarczającą wytrzymałość mechaniczną i porcelana ma wtedy skłonności do odpadania [5].

Jedną z metod używaną w medycynie do wytwarzania warstw pośrednich jest proces zol-żel. Warstwy zol-żel charakteryzują się niską grubością (dochodzącą do kilku µm), wysoką homogenicznością oraz stabilnością chemiczną i mechaniczną [4-9]. Ponadto prowadzone badania przez autorów publikacji [8, 9] wskazują na dobre właściwości adhezyjne tych powłok do materiału podłoża jak i do porcelany dentystycznej. Prezentowana praca dotyczy badań mikrostruktury i morfologii powłok krzemionkowych i krzemionkowo – tytanowych na czystym technicznie tytanie oraz jego stopie, jako potencjalnych powłok zwiększających trwałość połączenia konstrukcji metal – porcelana.

### 2. Metodyka badań

Do badań jako materiał podłoża wykorzystano czysty technicznie tytan Ti (ASTM-grade 2) i jego stop Ti6Al4VELI (ASTM-grade 5). Materiały te były gorącowalcowane, przy czym Ti był wyżarzany a Ti-6Al4VELI przesycany (obróbka cieplna T4). Próbki miały postać prostopadłościennych płytek o wym. 20x10x0.5 mm.

Jako powłoki zastosowano dwa rodzaje zoli: SiO<sub>2</sub> oraz SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub>. Powłoki nakładano metodą zol-żel. Zol krzemionkowy otrzymano przez hydrolizę czteroetoksysilanu Si(OC<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>4</sub> (TEOS) z dodatkiem HCl jako katalizatora. TEOS rozcieńczano alkoholem etylowym a następnie dodawano wodę w proporcji H<sub>2</sub>O :





Rys. 1. Zastosowanie dentystycznych materiałów tytanowych - zdjęcia: a) protezy, b) wszczepów implantów dentystycznych [10]

Fig. 1. Application of dental titanium materials – photographs: a) dental prosthetics, b) oral implants [10]

TEOS = 4 : 1. Końcowe stężenie krzemionki wynosiło 3 ÷ 5 % wagowych. Natomiast zol krzemionkowo – tytanowy otrzymano przez hydrolizę propoksylowej pochodnej Ti( $C_3H_7O$ )<sub>4</sub> i TEOS z dodatkiem HCl jako katalizatora. Końcowe stężenie TiO<sub>2</sub> + SiO<sub>2</sub> wynosiło 7.63 % wagowych.

Próbki tytanu pokrywano techniką wynurzeniową ze stałą prędkością wynoszącą 3.3 mm/s, a grubość powłoki regulowano przez stosowanie wielokrotnego wynurzania. Po nałożeniu filmu próbki suszono i wygrzewano w temp. ok. 600°C w atmosferze argonu. Obróbka cieplna usuwa wodę i zagęszcza powłokę, zwiększając trwałość wiązania pomiędzy powłoką a podłożem.

Do badań powierzchni powłok wykorzystano mikroskop skaningowy LEO 1430VP z EDX – Roentec.

### 3. Rezultaty i dyskusja

Zdjęcia mikrostruktur powłok SiO<sub>2</sub> i SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> przedstawiono na rys. 2. Powłoki te są zwarte, dobrze przylegają do podłoża i są jednorodne chemicznie [11]. Na powierzchni powłoki SiO<sub>2</sub> widoczne są mikropęknięcia (Rys. 2a). Natomiast mikrostruktura









Fig. 3. EDX spectra of different coatings: (a)  $SiO_2$  and (b)  $SiO_2$ -TiO<sub>2</sub>

warstwy  $SiO_2-TiO_2$  składa się z mieszaniny cząstek  $SiO_2$  otoczonej żelem  $TiO_2$ , co jest wynikiem suszenia i wygrzewania filmu powłoki. Grubość warstw zol-żel wynosiła ok. 3 µm. Parametr wielkości chropowatości R<sub>a</sub> dla powłok  $SiO_2$  wynosiła 0.63 µm, a dla powłok  $SiO_2-TiO_2$  0.82 µm.

Występujące mikropęknięcia w powłoce  $SiO_2$  są wynikiem obróbki cieplnej. Jednak pęknięcia te nie są głębokie i nie wpływają znacząco na obniżenie właściwości chanicznych i fizycznych, a nawet mogą powodować lepsze "zakotwiczanie" się porcelany podczas procesu napalania [8, 9].



*Rys. 4. Analiza rozkładu pierwiastków w powłoce*  $SiO_2-TiO_2$ : *a) mikrostruktura b) Si, Ti, O, c) Si, d) Ti, e) O Fig. 4. Analysis distribution element in*  $SiO_2-TiO_2$  *coating: a) microstructure, b) Si, Ti, O, c) Si, d) Ti, e) O* 



*Rys. 5. Analiza rozkładu pierwiastków w powłoce*  $SiO_2$ : *a) mikrostruktura b) Si, Ti, O, c) Si, d) Ti, e) O Fig. 5. Analysis distribution element in*  $SiO_2$  *coating: a) microstructure, b) Si, Ti, O, c) Si, d) Ti, e) O* 

Według E. Milella i in. [7] mikropęknięcia formują się w wyniku kurczenia się powłoki podczas wygrzewania i wówczas mogą się one rozrastać iłączyć ze sobą tworząc większe obszary.

C. Guillčn [12] proponuje aby w przypadku grubszych powłok zol-żel, nakładać cieńsze warstwy wkilku wynurzeniach próbki z zolu, a następnie wygrzewać całość kompozytu metal – powłoka. Wówczas mechaniczne naciski nagromadzone podczas produkcji całej powłoki nie kumulują się tak jak w przypadku wygrzewania każdej z warstw osobno.

Mikroanalizę składu chemicznego warstw SiO<sub>2</sub> i SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> przedstawiono na rys. 3. Analiza EDX ujawnia obecność Si i/lub Ti w warstwach. W przypadku powłoki SiO<sub>2</sub> (rys. 3a) występuje zwiększona zawartość Si i O, podczas gdy w powłoce SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> obok Si i O zauważalna jest znacznie większa zawartość Ti. Takie zachowanie potwierdzają badania prowadzone przez E. Milella i in. [7]. Badania prowadzone przez E. Milella i in. [7] warstw hydroksyapatytu TiO<sub>2</sub> nie ujawniają obecności faz amorficznych. Można to argumentować tym, że początkowy amorficzny żel dwutlenku tytanu podczas obróbki cieplnej krystalizuje do "anatazu".

Dla powłok SiO<sub>2</sub> i SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> przeprowadzono analizę rozkładu podstawowych pierwiastków: Si, Ti i O (rys. 4 i 5). Badania "mappingu" wykazały jednorodność chemiczną obu powłok oraz równomierny rozkład badanych pierwiastków. Równomierny rozkład pierwiastków tworzących powłoki prognozuje równomierne właściwość warstw zol-żel w całym obszarze.

Powadzone przez autorów [8, 9, 13] badania zużycia powłok zol-żel wskazują na dobre właściwości adhezyjne. Rezultaty tych badań i wnikliwe studia literaturowe w zakresie tematu stwarzają podstawy do wytworzenia trwałego złącza: porcelana – warstwa pośrednia zol-żel – metal, za pośrednictwem silnego wiązania chemicznego. Dokonano nałożenia na powłokę pośrednią zol-żel niskotopliwej porcelany dentystycznej Triceram (firmy Dentaurum) (rys. 6). Wstępna analiza takiego układu wielowarstwowego wskazuje na dobre przyleganie porcelany do materiału podłoża, dzięki zastosowaniu warstwy pośredniej.

### 4. Podsumowanie i wnioski

Metody wykorzystujące proces zol-żel, pozwalają otrzymywać powłoki o korzystnych właściwościach fizycznych i chemicznych o szerokim wachlarzu zastosowań w medycynie. Warstwy SiO<sub>2</sub> i SiO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> charakteryzują się niską grubością i wysoką strukturalną homogenicznością. Dane literaturowe oraz wstępne badania prowadzone przez autorów stwarzają podstawy do stwierdzenia, że badane warstwy pośrednie zol-żel mogą dostarczyć trwałego połączenia pomiędzy porcelaną a tytanem. Wytworzenie silnego wiązania chemicznego przy zastosowaniu tych powłok może być przydatne w protetyce stomatologicznej.



*Rys. 6. Mikrostruktura porcelany dentystycznej z warstwą pośrednią na podłożu tytanowym – SEM [9] Fig. 6. Microstructure of dental porcelain with intermediate layers on titanium base – SEM [9]* 

### 5. Literatura

- [1] Nguyen H.Q., Deporter D.A., Pilliar R.M., Valiquetle N., Yakubovich R.: *The effect of sol-gel-formed calcium phosphate coatings on bone ingrowth and osteoconductility of porous-surfaced Ti alloy implants*, Biomaterials 25, 865-876, 2004.
- [2] Yokoyama K., Ichikawa T., Murakami H., Miyamoto Y., Asaoka K.: *Fracture mechanisms of retrieved titanium screw theread in dental implant*, Biomaterials 23, 2459-2465, 2002.
- [3] Niinomi M.: *Mechanical properties of biomedical titanium alloys*, Materials Science and Engineering A234, 231-236, 1998.
- [4] Breme J., Zhou Y., Groh L.: *Development of titanium alloy suitable for an optimized coating with hydroxyapatite*, Biomaterials 16, 239-244, 1995.
- [5] Metikos-Hukovic M., Tkalcec E., Kwokal A., Piljac J.: An in vitro study of Ti and Ti-alloys coated with sol-gel derived hydroxyapatite coatings. Surface Coatings. Technology 165, 40-50, 2003.
- [6] Matraszek H., Stoch A., Paluszkiewicz Cz., Brożek A., Długoń E.: Zastosowanie metody zol-żel w praktyce dentystycznej, Inżynieria Biomateriałów, 23-25, 72-74, 2002.
- [7] Milella E., Cosentino F., Licciulli A., Massaro C.: *Preparation and characterisation of titania/hydroxyapatite composite coatings obtained by sol-gel process*, Biomaterials 22, 1425-1431, 2001.
- [8] Surowska B., Walczak M., Bieniaś J.: Application of the sol-gel coatings in dental prosthetics, 12<sup>th</sup> International Scientific Conference, Achievements in Mechanical & Materials Engineering – AMME'2003, Gliwice – Zakopane 7–10 December, 871-874, 2003.
- [9] Surowska B., Walczak M., Bieniaś J.: The ceramic SiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> coatings on biomedical Ti6Al4VELI titanium alloy, Inżynieria Materiałowa artykuł przyjęty do druku.
- [10] http://www.oral-implant.com/implants-examples.htm 25.02.2004
- [11] Stoch A., Paluszkiewicz C., Gibała T., BolekA.: FTIR study of silica sol-gel deposited films on anodically oxydized aluminium, Journal Molecular Structure. 293, 287-290, 1993.
- [12] Guillén C., Martínez M. A., San Vicente G., Morales A., Herrero J.: Leveling effect of sol-gel SiO<sub>2</sub> coatings onto metallic foil substrates, Surface and Coating Technology 138, 205-210, 2001.
- [13] Zhang W., Liu W., Wang Ch.: Tribological behavior of sol-gel TiO<sub>2</sub> films on glass, Wear 253, 377-384, 2002.

\*\*\*\*\*

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego nr 4T08A04523 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2002/2005.

\*\*\*\*\*

### Mgr inż. Mariusz WALCZAK Mgr inż. Jarosław BIENIAŚ

Katedra Inżynierii Materiałowej Wydział Mechaniczny Politechnika Lubelska ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin tel. +48 (81) 5381211 fax +48 (81) 5381214 e-mail: m.walczak@pollub.pl e-mail: j.bienias@pollub.pl

## WYZNACZANIE PARAMETRÓW RUCHU SAMOCHODU OSOBOWEGO PODCZAS HAMOWANIA Z WYKORZYSTANIEM CZUJNIKÓW PRZYSPIESZEŃ

## DETERMINATION OF MOVEMENT PARAMETERS OF A CAR DURING BREAKING USING ACCELERATION SENSORS

Pomiary procesów jezdnych pojazdu, przebytej drogi, osiąganych prędkości i przyspieszeń są powszechnie stosowne do wyznaczania kierowalności i stateczności ruchu samochodu, decydujących o bezpieczeństwie pasażerów. Coraz powszechniej stosowane w pojazdach urządzenia wspomagające wyznaczają konieczność zwiększenia częstotliwości pomiarowej co ogranicza stosowalność dotychczasowych metod pomiarowych.

W artykule zaprezentowano możliwości i ograniczenia zastosowania czujników przyspieszeń ADXL 105 firmy Analog Device do pomiarów opóźnień samochodu osobowego podczas hamowania. W pracy zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych i drogowych oraz pojawiające się problemy określania prędkości i przebytej drogi przez pojazd w trakcie procesu hamowania.

Słowa kluczowe: czujniki przyspieszeń, proces hamowania

Measurements of driving properties of a vehicle, traveled distance, velocities and accelerations are commonly used in order to determine car's steerability and movement stability i.e. in order to determine its safety passengers. As devices used more and more commonly in cars require higher measuring frequencies the currently used measuring methods may require better alternatives. The article presents the potential and limitations of ADXL 105 Analog Devices acceleration sensors in applications measuring deceleration of a personal car during breaking. The paper presents results of laboratory and road tests as well as problems encountered while determining vehicle's speed and distance covered during a breaking process.

Keywords: acceleration sensors, braking process

### 1. Wstęp

Problematyka hamowania samochodu zdeterminowana jest potrzebami bezpieczeństwa i komfortu podróżnych. Bezpieczeństwo pojazdu samochodowego związane jest z niezawodnością, statecznością i trwałością działania hamulców, natomiast komfort zależy od ich progresywności działania i niewielkiego poziomu hałasu. Zasadniczy i oczywisty wymóg stawiany hamulcom to zdolność zatrzymania pojazdu w sposób optymalny ze względu na wyżej wymienione kryteria w warunkach zmiennych obciążeń pojazdu, zmiennego stanu nawierzchni drogi i jej ukształtowania. Skuteczność działania hamulców wyraża się praktycznie w wartości uzyskiwanego opóźnienia ruchu pojazdu w m/s2.

Od lat bada się kryterium opóźnienia ruchu pojazdu jak również inne czynniki wpływające na proces hamowania. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy przebieg procesu hamowania wraz z charakterystycznymi parametrami opisującymi ten proces: prędkością początkową, przebytą drogą i osiąganym opóźnieniem.

W artykule jest przedstawiona propozycja zastosowania mikroczujnika przyspieszeń ADXL 105 firmy Analog Devices do wyznaczania parametrów ruchu samochodu osobowego.

### 2. Czujniki przyspieszeń

Do pomiarów procesu hamowania wykorzystano czujniki przyspieszeń typu ADXL105 firmy Analog Devices. Czujniki tego typu wykonuje się w całości w pojedynczym chipie i umożliwiają pomiar przyspieszeń wzdłuż jednej osi, generując sygnał napięciowy proporcjonalny do działającego przyspieszenia. Wewnętrzna struktura półprzewodnikowa zbudowana jest z systemu mas sprężynujących oraz obwodu



Rys. 1. Przykładowy przebieg procesu hamowania Fig. 1. Exemplary course of process of braking

elektrycznego służącego do obliczania przyspieszeń na podstawie przemieszczania się tych mas względem nieruchomych okładzin kondensatora (rys. 2.).

Z czujnika przyspieszeń sygnał analogowy podawany jest na kartę A/C gdzie dokonywane jest próbkowanie i kwantowanie sygnału. Otrzymany sygnał cyfrowy jest w łatwy sposób archiwizowany w pliku na dysku komputera.

Czujnik ADXL 105 cechuje się małymi rozmiarami co pozwala na nieinwazyjny montaż na badanym pojeździe. Duża częstotliwość pomiarowa pozwala dynamicznie mierzyć i rejestrować zmiany przyspieszeń, jakim jest poddany pojazd w trakcie ruchu.

Z otrzymanych danych z czujnika można w prosty sposób wyliczyć przebytą przez pojazd drogę, jednakże potrzebna jest do tego informacja o stałych całkowania, np. o chwilowej prędkości na początku pomiaru. W przeprowadzonych pomiarach drogowych do wyznaczenia prędkości początkowej zostały wykorzystane urządzenia fotooptyczne. Dodatkową stałą całkowania jest również prędkość na końcu procesu, zwłaszcza w przypadku zatrzymania pojazdu na końcu cyklu pomiarowego.

#### a) neuchome kierunek osi czułej na przyspieszenia uchomy element delektryczny masa bezwładna ż dładzina delektryczny masa bezwładna ż dładzina elektryczny kierunek osi czułej na przyspieszenia t dładziny delektryczny kierunek osi czułej na przyspieszenia uchomy element bezwładna bezwładna kierunek osi czułej na przyspieszenia uchomy element delektryczny kierunek osi czułej na przyspieszenia delektryczny de

### 3. Bbadania laboratoryjne

Celem badań było doświadczalne określenie przydatności czujników przyspieszeń do określania parametrów ruchu badanego obiektu na podstawie otrzymanych wyników. Wszystkie pomiary z wykorzystaniem czujników przyspieszeń były wykonane w trzech etapach:

- wyznaczanie stabilności wskazań,
- pomiary na wibratorze hydraulicznym,
- pomiary na siłowniku pneumatycznym o dużym skoku.

Uzyskane wyniki zawierają w sobie wpływ wszystkich cech i parametrów konstrukcyjnych urządzeń, na których wykonane były pomiary.

Badanie stabilności czujnika dla pomiarów statycznych wykazało, iż otrzymane wyniki są powtarzalne, a błąd wyznaczenia wartości średniej wskazań dla pomiarów jest mniejszy od czułości czujników.

Pomiary na wibratorze hydraulicznym wykonano dla zadanej drogi, którą był przebieg sinusoidalny o amplitudzie 20 mm i częstotliwości 5 Hz. Obliczone przebiegi z chwilowych przyspieszeń charakteryzo-



- Rys. 2. Budowa wewnętrzna układu ADXL105: a) schemat struktury, b) zdjęcie struktury wykonane przy pomocy Elektronowego Mikroskopu Skaningowego [5]
- Fig. 2. Structure of internal match ADXL105: a) scheme of structure, b) photo of structure with the aid of Scanning Electron Microscope [5]



Rys. 3. Wykres uzyskanego przyspieszenia Fig. 3. Diagram of gotten acceleration



Rys. 4. Wykres przebytej drogi Fig. 4. Diagram traveled distance

wały się taką samą częstotliwością przemieszczeń oraz amplitudą co wartości zadane.

Pomiary z wykorzystaniem siłownika pneumatycznego miały na celu określenie dokładności przyjętej metody wyznaczania przemieszczenia. Ruch siłownika odbywał się w poziomie, a oś czujnika przyspieszeń była ustawiona w kierunku działającego wymuszenia oraz prostopadle do działania siły grawitacyjnej ziemi.

Na wykresach przedstawiono przyspieszenie oraz przebytą drogę. Na rysunku 4. uwidoczniona jest droga zarejestrowana przez sterownik urządzenia oraz wyliczona z otrzymanych przyspieszeń, jaką przebył siłownik. Widoczne różnice spowodowane są pozornym ruchem obiektu poprzez pojawienie się wskazań pomimo pomiarów statycznych, co związane jest z charakterystyką czujnika przyspieszeń i szumami generowanymi przez kartę A/C. Dla przeprowadzonych pomiarów maksymalny błąd względny wyznaczenia przebytej drogi wyniósł 3,77%.

### 4. Badania drogowe

Celem badań drogowych była doświadczalna weryfikacja przyjętej metody przekształceń matematycznych i próba określenia błędów wskazań czujnika.

Na wykresie przedstawiony jest przykładowy przebieg opóźnienia oraz wyliczony przebieg prędkości podczas procesu hamowania. Wykorzystanie prędkości chwilowej jako stałej całkowania generuje błąd na końcu procesu wynikający z braku uwzględnienia zjawisk obrotu nadwozia w procesie hamowania. Sygnał z urządzenia fotooptycznego był punktem startowym do obliczeń przebytej przez pojazd drogi. Przebyta przez pojazd droga była mierzona od miejsca ustawienia urządzenia fotooptycznego do zatrzymania się pojazdu.



Rys. 5. Wykres procesu hamowania Fig. 5. Diagram of breaking process

Duży błąd w obliczenia wnosi składowa przyspieszenia ziemskiego, której wpływ jest związany z przechyłem bryły nadwozia pojazdu podczas hamowania. Istotność przechyłu i jego wpływ jest uwidoczniona na rysunku 1. oraz 5. gdzie obliczona prędkość pojazdu już przed zatrzymaniem ma wartość ujemną.

### 5. Analiza czynników wpływających na dokładność pomiaru

Znajomość dokładności pomiarowej czujników jest ważnym zagadnieniem pozwalającym wnioskować o prawidłowości przeprowadzonych prób pomiarowych. Źródłem błędów w pomiarach są:

- błędy związane z montażem powierzchniowym czujnika na płytce,
- błędy związane z wpływem temperatury,
- błędy z przetwarzaniem sygnału pomiarowego przez przetwornik A/C.

Błędy montażowe mają wpływ na ustawienie osi czujnika względem bazy odniesienia. Precyzyjne określenie położenia osi czujnika pozwala na jego prawidłowe ustawienie względem działającego wymuszenia. Wpływ temperatury na czułość wskazań czujnika z układem ADXL105 w warunkach pokojowych może wynieść do 0,5% [3].

Błędy przetwarzania sygnału przez przetwornik A/C jest bezpośrednio związane z typem zastosowanego przetwornika, jak również z:

- błędami próbkowania,
- błędami kwantowania,
- nieliniowością całkową,
- nieliniowością różnicową,
- błędem wzmocnienia,

- błędem przesunięcia zera,
- szumami.

W trakcie wyznaczania parametrów ruchu obiektu uwidoczniły się następujące błędy:

- błąd pomiarowy czujnika,
- błąd numeryczny przekształceń matematycznych,
- błąd ustawienia czujnika względem działającego wymuszenia.

Błąd pomiarowy czujnika nie da się jednoznacznie określić i nie jest wielkością stałą natomiast kolejne błędy można uwzględniać i wprowadzać korektę w uzyskanych wynikach. Całkowanie numeryczne jest obarczone błędem, który zależy od:

- stałej całkowania,
- przyjętej metody całkowania,
- wartości funkcji całkowej w danym punkcie.

Niedokładność ustawienia osi czujnika w kierunku ruchu powoduje, iż uzyskane wartości przyspieszeń będą składowymi działającego wymuszenia. Pochylenie osi czujnika o 3° względem linii prostopadłej do linii pola grawitacyjnego powoduje pojawienie się stałego rejestrowanego sygnału, który wynosi około 0,5 m/s<sup>2</sup>. Znajomość kąta pochylenia osi czujnika pozwala na wprowadzenie korekty wskazań i uzyskanie realnych wartości przyspieszeń.

Wadą tych czujników jest ograniczona dokładność do  $\pm 0,02$ m/s<sup>2</sup>, która powoduje konieczność wprowadzania korekty wskazań ze względu na występowanie pozornych przemieszczeń badanego obiektu pomimo braku ruchu rys. 4. Czujnik jest wykorzystywany w chwili obecnej do pomiarów procesu przyspieszania i hamowania samochodu osobowego. Wymaga to jednak uwzględnienia wpływu sił grawitacji na
wyniki pomiarów. Związane to jest z dynamicznymi zmianami położenia nadwozia samochodu podczas jego ruchu. Podstawową trudnością z uwzględnieniem grawitacji jest określenie bieżącego nachylenia osi czujnika względem pola grawitacyjnego.

#### 6. Podsumowanie

Znajomość uzyskiwanego przez pojazd przyspieszenia pozwala na wyznaczenie jego prędkości i przebytej drogi. Pomiary przyspieszeń, ze względu na przekształcenia jakim podlegają w procesie przetwarzania z postaci analogowej na cyfrową są obarczone błędami tych przekształceń. Przeprowadzone badania laboratoryjne z użyciem czujników przyspieszeń pozwoliły stwierdzić, iż występuje powtarzalność wskazań a dokładność pomiarowa pozwala określić parametry ruchu badanego obiektu.

Na podstawie badań drogowych procesu hamowania wykazano konieczność wprowadzenia korekty wskazań związanej z dynamicznym przechyłem bryły nadwozia. Czujniki przyspieszeń typu ADXL 105 ze względu na częstotliwość pomiarową pozwalają na dość dokładne odzwierciedlenie procesu hamowania, a w uzyskiwanych wynikach uwidacznia się faza początkowa i końcowa procesu.

#### 7. Literatura

- [1] Accelerometers przyspieszeniomierze, http://www.alfine.com.pl/analog/offer/s\_adxl.htm.
- [2] Dąbrowski A. (red.): *Przetwarzanie sygnałów przy użyciu procesorów sygnałowych*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2000.
- [3] Dokumentacja techniczna czujnika ADXL 105, firmy Analog Devices.
- [4] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: Metody numeryczne, WNT, Warszawa 1993.
- [5] Graham B. B.: Using an accelerometer sensor to measure human hand motion. Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [6] Pochyłomierz elektroniczny, Elektronika Praktyczna, 12/2000, str. 35-37
- [7] Ślaski G., Kupiec J., Waleriańczyk W.: *Badanie procesu hamowania analiza różnych metod badawczych*, Materiały Konferencyjne: Konferencja Hamulcowa, 2001.

#### Mgr inż. Konrad J. WALUŚ

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechnika Poznańska ul. Piotrowo 3; 60-965 Poznań tel. (061) 665 20 47; fax (061) 665 20 74 e-mail Konrad.Walus@.put.poznan.pl

# ZAGADNIENIE BIOMECHANICZNEJ BIOKOMPATYBILNOŚCI KOŚCI I MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH IMPLANTÓW ORTOPEDYCZNYCH W ŚWIETLE WSPÓŁCZESNEGO DWUFAZOWEGO POROSPRĘŻYSTEGO MODELU TKANKI KOSTNEJ

# PROBLEM OF THE BIOMECHANICAL BIOCOMPATIBILITY OF BONE AND CONSTRUCTIONAL MATERIALS FOR BONE IMPLANTS IN THE LIGHT OF MODERN TWO-PHASE POROELASTIC MODEL OF BONE TISSUE

Konstrukcję układu biomechanicznego kość-implant, np.: konstrukcję sztucznego stawu biodrowego tworzącą konstrukcję nośną organizmu charakteryzuje zespół cech materiałowych, geometrycznych i dynamicznych, dobranych ze względu na osiągnięcie założonego celu. Analiza zagadnienia zgodności strukturalno-biomechanicznej kości i biomateriału wszczepu rozpatrzona na podstawie nowego dwufazowego porosprężystego modelu tkanki kostnej może dostarczyć nowych przesłanek odnośnie zwiększenia poziomu niezawodności wszczepianych sztucznych stawów i wydłużenia okresu ich eksploatacji bez konieczności reimplantacji. Praca przedstawia istotę porosprężystego modelu tkanki kostnej oraz własne badania właściwości mechanicznych kości.

*Słowa kluczowe:* model kości, implanty ortopedyczne, materiały porowate, współpraca na powierzchni kość-implant.

The construction of biomechanical system bone-implant e.g. construction of artificial hip joint, composing carrying construction of living organism, is characterized by set of material, geometrical and dynamic attributes, selected to fulfil required assumptions. The principal goal of biomechanical research of orthopaedic implants is to provide durability and stability of considered biomechanical system. Biomaterials assigned for orthopaedic implants and for bone graft substitutes have to satisfy series of requirements connected not only with biological response of living tissue. Analysis of structural-biomechanical compatibility of bone tissue and constructional materials of bone implant considered on the grounds of modern two-phase poroelastic model for bone tissue might afford additional knowledge required for increasing of reliability of discussed constructions and extension of its operating period without necessity of reimplantation. This paper presents the essence of the two-phase poroelastic model of bone illustrated with owns research of mechanical properties of bone.

*Keywords:* model of bone, porous orthopedic implants, biosubstitute, bone-implant interface.

#### 1. Wprowadzenie

Chirurgia ortopedyczna uzależniona jest od implantowania sztucznych biomateriałów do organizmu. Endoprotezoplastyka stawu biodrowego jest najczęściej stosowanym zabiegiem chirurgicznym polegającym na całkowitym zastąpieniu chorego stawu przez sztuczny staw i wiąże się z wprowadzeniem do środowiska wewnętrznego człowieka ciał obcych zzałożeniem, że spełniając długotrwale wyznaczoną im funkcję biomechaniczną, będą biologicznie obojętne [10]. Operacja wszczepienia sztucznego stawu pozwala pacjentom w 90% przypadków na powrót do normalnego życia, pozbawionego bólu związanego z dolegliwością chorego stawu, pozwala na wznowienie pracy, a czasem nawet powrót do aktywnego uprawiania sportu, na 10 do 20 lat, kiedy to w wyniku zużycia lub obluzowania komponentów totalnej alloplastyki zachodzi konieczność operacji rewizyjnej [16]. O biomechanicznej prawidłowości rekonstrukcji stawu biodrowego decydują relacje odkształceniowo-naprężeniowe w kości oraz w implancie [8, 10]. Zrozumienie klinicznego niepowodzenia biomechaniki totalnej alloplastyki stawu biodrowego wymaga wiedzy dotyczącej sił przenoszonych przez staw biodrowy, naprężeń, które generują one w kości i materiale implantu, ich wpływu na zużycie i związane z tym ryzyko uszkodzenia oraz przebudowę tkanki kostnej. Biomechanika pozwala przewidzieć potencjalne scenariusze niepowodzenia implantacji (failure scenarios), których znajomość niezbędna jest do przeprowadzenia badań poprzedzających kliniczne zastosowanie implantów [8, 9, 15, 16]. W przypadku bezcementowej endoprotezoplastyki czynnikami, które odgrywają istotną rolę w zapewnieniu stabilności i trwałości implantacji są osteointegracja oraz adaptacyjne wrastanie tkanki kości w zaprojektowaną w tym celu mikrostrukturę porową na powierzchni implantu. Wrastanie tkanki kostnej i osteointegracja warunkują trwałe połączenie kości z implantem w przypadku trzpieni endoprotez bezcementowych stawu biodrowego pokrytych warstwą materiału porowatego (stosuje się pokrycia metaliczne lub ceramiczne, rys. 1), wszczepianych do kanału szpikowego kości udowej [26, 28].

Osiągnięcie prawidłowej stabilności porowatych implantów kostnych zależy od procesu adaptacyjnego wrastania tkanki kostnej do przestrzeni porowej porowatego materiału konstrukcyjnego implantu kostnego. Z mechanicznego punktu widzenia proces ten determinowany jest głównie przez ukształtowanie mikropowierzchni implantu, gdyż styk kość-implant jest połączeniem głównie mechanicznym. Proces osteointeintegracji polegający na zapewnieniu mechano-fizyko-biochemicznego wiązania biomateriału z kością zachodzi w przypadku, gdy porowate podłoże implantu pokryte jest biozgodną ceramiką hydroksyapatytową o identycznej strukturze krystalograficznej jak mineralna część tkanki kostnej.

Porowate powłoki nanoszone na implant różnymi technikami, wśród których najpopularniejszą jest napylanie plazmowe [22], zwiększają powierzchnię współpracujących części (kości i implantu), co pozwala na przeniesienie obciążeń zginających i ścinających oraz wzrost odporności na działanie sił ścinających [13]. Dla potrzeb chirurgii ortopedycznej stosuje się kilka rodzajów mikrostruktury powierzchni porowatych implantów tj.: kulki, włókna, proszek, siatki, bezkierunkowe amorficzne struktury (rys. 1.).

# 2. Istota porosprężystego modelu tkanki kostnej

Tkanka kostna reaguje na nowe mechaniczne otoczenie pola naprężeń stworzone przez implant adaptacyjną przebudową swojej zewnętrznej i wewnętrznej struktury, której prawa zostały sformułowane przez Wolffa [29]. Mechanizm opisujący istotę adaptacyjnej przebudowy tkanki kostnej w odpowiedzi na historię obciążeń mechanicznych kości (tzw. właściwości mechaniczno-adaptacyjne) interpretowany na podstawie nowego dwufazowego (porosprężystego)



*Rys. 1. Przykłady porowatych warstw na powierzchni implantów: a), b) powłoki metaliczne, [1, 12], c) powłoka ceramiczna (hydroksyapatyt) /badania własne/* 



modelu tkanki kostnej wprowadzonego do klinicznej biomechaniki ortopedycznej w Polsce w 2002 roku [17, 18] zilustrowano schematem przedstawionym na rys. 2. Właściwości mechaniczno-adaptacyjne kości przejawiają się w postaci przebudowy zewnętrznej (external remodeling, tj. zmiany kształtu przekroju poprzecznego trzonu kości długiej) i tzw. przebudowy wewnętrznej (internal remodeling, tj. zmiany właściwości porosprężystych materiału ściany trzonu kości długiej przez zmianę porowatości kości korowej). Przebudowa ta stymulowana jest przez właściwości mechatroniczne kości, które zobrazowano za pomocą przetwornika mechanoelektrycznego TRANS i potencjałów SGPs (strain generated potentials).

Wytłumaczenie zjawisk mechano-elektrycznych w kościach, znanych od ponad 40 lat, lecz różnorodnie interpretowanych, na które zasadniczy wpływ ma ruch jonowego płynu porowego w przestrzeni porowej kości korowej indukowany obciążeniem mechanicznym kości, na podstawie teorii ośrodka porosprężystego wypełnionego lepkim płynem jonowym zostało przedstawione stosunkowo niedawno [19, 20, 24, 25]. Teoria ta, zweryfikowana doświadczalnie [21], wskazuje na konieczność zmiany podstawowego modelu biomechanicznego kości z jednofazowego (ciało stałe sprężyste) na dwufazowy: ciało porosprężyste wypełnione lepkim płynem jonowym [5, 17, 27].

Biokompatybilność strukturalno-biomechaniczna tkanki kostnej i biomateriału wszczepu rozpatrywana na podstawie modelu porosprężystego obejmuje kompatybilność wartości: współczynnika porowatości (lub współczynnika poroprzepuszczalności k dla płynu) oraz czterech współczynników porosprężystości (np. N, A, Q, R – tzw. współczynników materiałowych porosprężystości Biota-Willisa). Wynika stąd konieczność określenia stopnia kompatybilności biomechanicznej kości z implantem kostnym, zapewniającego optymalną stabilność wszczepów endokostnych. Związki fizyczne teorii dynamicznej porosprężystości podanej przez Biota w przypadku trójwymiarowych zagadnień dynamicznych [2, 3, zob. także 11] mają postać:

relacje naprężeniowo-odkształceniowe

$$\sigma_{ij}^{s} = 2N\varepsilon_{ij} + (A\varepsilon + Q\Theta)\delta_{ij}$$
  
$$\sigma^{f} = O\varepsilon + R\Theta$$
 (1)

gdzie:  $\sigma_{ij}^{s}$  – tensor naprężeń materiału fazy stałej,  $\varepsilon_{ij}$ -tensor małych odkształceń sprężystych materiału fazy stałej,  $\varepsilon = \varepsilon_{il}$  – dylatacja (ślad tensora  $\varepsilon_{ij}$ ),  $\sigma^{f}$  – naprężenia w płynie porowym,  $\Theta$  - dylatacja płynu, *N*, *A*, *Q*, *R* – stałe porosprężystości Biota-Willisa,  $\delta_{ij}$  – delta Kroneckera, i, j = 1, 2, 3;

- prawo Darcy

$$\dot{W}_i - \dot{w}_i = -k\nabla\sigma^f \tag{2}$$

gdzie:  $\dot{W}_i$  – średnia wartość w elementarnym obszarze reprezentatywnym wektora prędkości płynu,  $\dot{w}_i$  – średnia wartość w elementarnym obszarze reprezentatywnym wektora prędkości cząstek materiału fazy stałej, *k* – stała poroprzepuszczalności materiału porowatego dla płynu, i = 1, 2, 3.

#### 3. Badania właściwości mechanicznych kości

W celu wykazania mechanicznego znaczenia fazy płynnej w kości oraz jej mechatronicznych właściwości wynikających z obecności w niej jonowego płynu wykonano badania laboratoryjnego ściskania próbek kości korowej. Badania prowadzono na kości wołowej, będącej uznanym i szeroko stosowanym modelem zwierzęcym, adekwatnym do ludzkiej korowej tkanki kostnej.



Rys. 2. Kość jako układ biodynamiczny (biomechatroniczy) [16] Fig. 2. Bone as a biodynamic system (biomechatronic system) [16]

Kości udowe pochodzące od siedmioletniej krowy, dostarczone przez Zakłady Mięsne w Śremie, starannie oczyszczono z zewnętrznej warstwy okostnej. Następnie podzielono je na kostne pierścienie o wysokości około 10 mm i z każdego pierścienia wycięto cztery segmenty kostne pochodzące z przedniej, tylnej, przyśrodkowej i bocznej części pierścienia. Dalej według [23] z każdego segmentu kostnego wykonano na frezarce kostkę sześcienna o boku 7 mm. Badania prowadzono na dwóch rodzajach próbek - z kości świeżej poddanej obróbce bezpośrednio, tj. do 6 godzin po resekcji oraz z kości suchej. Kość suchą otrzymano przez trawienie sześciennych próbek kostnych 7 procentowym roztworem KOH w celu usunięcia fragmentów organicznych z przestrzeni porowej kości [7], następnie próbki dwuetapowo suszono.

W pierwszym etapie, zwanym odwadnianiem, usunięto roztwór KOH z przestrzeni porowej próbek kostnych przez stopniowe zastępowanie go alkoholem o wzrastającym stężeniu, zgodnie z procedurą podaną w [7]. W drugim etapie pozostawiono prób-

ki na 48 godzin w temperaturze pokojowej celem odparowania alkoholu. Przebieg suszenia kontrolowano metodą wagową. Charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe otrzymano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej TIRAtest 24250 produkcji niemieckiej. Rysunek 3 przedstawia wykresy charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych otrzymanych podczas ściskania próbek kości suchej i kości świeżej; ściskanie prowadzono aż do zniszczenia próbek. Kształt charakterystyk naprężeniowoodkształceniowych w przypadku kości suchej (rys. 3a) jednoznacznie wskazuje na to, że jest ona materiałem sprężysto-kruchym. W przypadku kości świeżej (rys. 3b) powyżej zakresu sprężystego jest widoczny odcinek odpowiadający odkształceniom plastycznym, wskazujący, że kość świeża jest materiałem sprężysto-plastvcznvm.

Porównanie charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych uzyskanych ze ściskania kości suchej i świeżej jednoznacznie wskazuje na istotny wpływ obecności ciągłej fazy płynnej w przestrzeni



*Rys. 3. Charakterystyki naprężenie-odksztalcenie uzyskane podczas ściskania próbek kości: a) suchej, b) świeżej Fig. 3. Strain-stress curves obtained during compression tests of samples of: a) dry bone, b) fresh bone.* 



Rys. 4. a) Charakterystyki naprężenie-odkształcenie uzyskane podczas ściskania wybranej próbki kości świeżej (wymiary: 7x7x7 mm), przy różnych szybkościach obciążania: 100 N/s (1), 500 N/s (2), 1000 N/s (3), 5000 N/s (4), 10000 N/s (5); b) Zależność modułu Younga od szybkości obciążania dla 3 wybranych próbek.

Fig. 4. Strain-stress curves obtained during compression tests on the selected sample of fresh bone (specimen dimension: 7x7x7) with the various load rate; 100 N/s (1), 500 N/s (2), 1000 N/s (3), 5000 N/s (4), 10000 N/s (5); b) Dependence of the elastic modulus on the load rate, results obtained from 3 bone samples.

porowej kości przede wszystkim na właściwości mechaniczne kości. Ponadto poszczególne próbki kości świeżej poddano ściskaniu w zakresie sprężystym z różną prędkością. Otrzymano różne wartości kątów nachylenia charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych przy różnych prędkościach odkształcania (tj. stwierdzono tzw. lepkosprężyste właściwości kości), co wynika z obecności i przepływu lepkiego płynu w przestrzeni porowej kości korowej. Rys. 4a przedstawia przykładowe wyniki w postaci charakterystyk naprężenie-odkształcenie uzyskane podczas ściskania wybranej próbki kości z różnymi szybkościami odkształcania, zaś rys. 4b zależność modułu Younga od szybkości odkształcania dla 3 wybranych próbek. Otrzymane wyniki są zgodne jakościowo z [4, 17] oraz ilościowo z [6].

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Właściwości porosprężyste oraz mechatroniczne (mechano-elektryczne) tkanki kostnej warunkują powstanie potencjałów SGPs będących czynnikiem stymulującym adaptacyjną przebudowę tkanki kostnej w odpowiedzi na historię obciążeń mechanicznych kości, co determinuje m.in. uzyskanie prawidłowej stabilności wszczepów endokostnych i zwiększenie ich niezawodności. Trwałość implantacji porowatych materiałów biozastępczych zależy bowiem od efektywności adaptacyjnego wrastania tkanki kostnej do przestrzeni porowej metalowego porowatego materiału konstrukcyjnego implantu endokostnego.

Wyniki przedstawionych w pracy badań własnych ukazują świeżą kość korową jako materiał lepkosprężysty. Właściwości lepkosprężyste w kości świeżej, mokrej oraz in vivo wynikają z przepływu lepkiego płynu porowego generowanego odkształceniem fazy stałej kości. Dwufazowy porosprężysty model tkanki kostnej, w odróżnieniu od obowiązującego w biomechanice ortopedycznej od ponad stu lat modelu jednofazowego, pełniej opisuje jej właściwości biomechaniczne. Ponadto wynikające z towarzyszących przepływowi w przestrzeni porowej kości płynu jonowego zjawisk mechatronicznych (mechano-elektrycznych), właściwości biodynamiczne kości, bedace biomechano-eletrofizjologicznym czynnikiem stymulującym przebudowę kostną, pozwalają na dokładniejszy opis mechanizmów warunkujących niezawodność implantacji wszczepów dokostnych. Dlatego analiza zgodności biomechanicznej pomiędzy tkanka kostną a wszczepem przeprowadzona na podstawie modelu porosprężystego oraz badania właściwości mechatronicznych kości mogą dostarczyć dodatkowych przesłanek odnośnie możliwych przyczyn obluzowań endoprotez bezcementowych oraz mogą pozwolić opracować takie rozwiązania konstrukcyjne tych endoprotez, które byłyby bardziej konkurencyjne w stosunku do innych rodzajów endoprotez.

#### Podziękowania

Składam serdeczne podziękowania Panu dr hab. bioinż. lek. med. Ryszardowi Uklejewskiemu, prof. nadzw. Akademii Bydgoskiej, Panu Prof. dr hab. inż. Januszowi Mielniczukowi z Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Poznańskiej oraz Panu dr n. med. Piotrowi Rogali z Kliniki Ortopedii Akademii Medycznej w Poznaniu za cenne konsultacje udzielone podczas prowadzonych badań i powstawania pracy.

#### 5. Literatura

- [1] An Y. H., Draughn R. A. (red.): *Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface*, CRC Press, Boca Raton, London, New York Washington DC, 2000.
- [2] Biot M.A.: *Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range*, J. Acoust. Soc. Am., 1956, 28(2), s. 179–191.
- [3] Bourbie T., Coussy O., Zinszner B.: Acoustics of Porous Media, Huston TX, Gulf-Publ. Co., 1987.
- [4] Carter D. R., Hayes W. C.: *The compressive behavior of bone as a two-phase porous structure*, J. Bone Jt Surg., 1977; 59A (7): 954-962.
- [5] Cowin S. C.: Bone poroelasticity, J. Biomechanics, 1999, 32, s. 217-238.
- [6] Currey J. D.: Bones: Structure and Mechanics, Princetown University Press, Princeton and Oxford, 2002
- [7] Dickson G. R.: *Methods of Calcified Tissue Preparation*, Department of Anatomy, The Queen's University of Belfast, 1984.
- [8] Huiskes R., Vendonschot N.: Biomechanics of artificial joint: the hip, w: Mow V. C., Hayes W. C. (red.): Basic Orthopedic Biomechanics, Lippincott Williams & Wilkins, New York 1997.
- [9] Huiskes R., Vendonschot N.: *Failure Scenarios and the Innovation Cycle*, w: Callaghan J. J., Rosenberg A. G. Rubash H. E.: The Adult Hip, Lippincott-Raven Publishers, Philadelphia, New York, 1998, s.171-186.
- [10] Kusz D.: Zastosowanie badania densytometrycznego w ocenie wyników endoprotezoplastyk stawu biodrowego z uwzględnieniem komputerowej symulacji rozkładów naprężeń w tkance okołoprotezowej, (rozpr. hab.), Wyd. Śląskiej Akademii Medycznej, Katowice 1988.

- [11] Kubik J., Cieszko M., Kaczmarek M.: *Dynamika nasyconych materiałów porowatych*. Wydawnictwo Inst. Podst. Probl.. Techniki PAN, Warszawa 2000.
- [12] Marciniak J.: Biomaterialy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [13] Morcher E.W.: Hydroxyapatite coating of prostheses, J. Bone and Joint Surg. 73-B, No. 5, 1991, s. 705-706
- [14] Mow V. C., Hayes W. C.: Basic Orthopedic Biomechanics, Lippincott Williams & Wilkins, New York 1997.
- [15] Prendergast P. J.: Biomechanical Techniques for Pre-clinical Testing of Prostheses and Implants, Wyd. AMAS, Warszawa, 2001.
- [16] Prendergast P. J.: Bone Prostheses and Implants, w: Cowin S. C. (red.): Bone Biomechanics Handbook, 2. Ed., CRC Press, Boca Raton, Fl USA, 2001.
- [17] Rogala P., Uklejewski R., Stryła W.: *Współczesny porosprężysty model biomechaniczny tkanki kostnej. Część 1 i 2*, Chirurgia Narządów Ruchu i Ortopedia Polska, 2002, 67 (3), s. 309–316; 68 (4), s. 395–403.
- [18] Rogala P., Uklejewski R., Stryła W.: Współczesny porosprężysto-elektryczny model biomechanicznoelektrofizjologiczny tkanki kostnej, w: Biliński P. J. (red.) Ortopedia i Traumatologia u Progu Nowego Millenium, Wydawnictwo Stowarzyszenia na Rzecz Rozwoju Ortopedii Bydgoskiej (ISBN 83-87383-62-7), Bydgoszcz 2002, s. 336-340.
- [19] Salzstein R. A., Pollack S. R.: *Electromechanical potentials in cortical bone II. Experimental analysis,* J. Biomech., 1987, 20 (3), s. 271–280.
- [20] Salzstein R. A., Pollack S. R., Mak A. F. T., Petrov N.: *Electromechanical potentials in cortical bone I. A continuum approach*, J. Biomechanics, 1987, 20 (3), s. 261–270.
- [21] Scott G. C., Korostoff E.: Oscillatory and step response: Electromechanical phenomena in human and bovine bone, J. Biomech., 1990, 23 (2), s. 27–43.
- [22] Sřballe K.: Hydroxyapatite ceramic coating for bone implant fixation, Acta Orthopaedica Scandinavica, Suppl.. 255, 64, 1993.
- [23] Turner C. H., Burr D. B.: Experimental techniques for bone mechanics, w: Cowin S. C. (red.): Bone Biomechanics Handbook, 2nd ed., Boca Raton, CRC Press, USA, 2001.
- [24] Uklejewski R.: Kość jako wypelniony płynem dwufazowy ośrodek porowaty, Prace Inst. Podst. Probl. Techniki PAN, nr 16/1992.
- [25] Uklejewski R.: O efektach elektromechanicznych w porowatej kości zbitej wypełnionej płynem fizjologicznym i efekcie akustoelektrycznym w trzonach kości długich mokrych, Warszawa, Wyd. Inst. Biocybern. i Inż. Biomed. PAN, Warszawa 1994.
- [26] Uklejewski R., Winiecki M., Rogala P., Czapski T.: On mechanoelectric and electroacoustic properties of bone, Part 1. Mechanoelectric properties of cortical bone, Proceedings of the VIII International Conference "Theoretical and Experimental Problems of Materials Engineering", Prievidza, Słowacja, wrzesień 2003 r.
- [27] Uklejewski R.: *Theory of the eletromechanical potentials generation in a fluid-filled cortical bone*, Biocyberbetics and Biomedical Engineering, 13, 1-4, 1993
- [28] Winiecki M., Czapski T.: Własności mechatroniczne i elektroakustyczne kości, cz. 1. Własności mechatroniczne kości korowej, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Maszyny Robocze i Transport, 2004, nr 57, /w druku/.
- [29] Wolff J.: Das Geset der Transformation de Knochen [The Law of Bone Remodelling], Springer-Verlag, Berlin, 1892.

#### Mgr inż. Mariusz WINIECKI

Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechnika Poznańska ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. +48 (61) 6652047, fax +48 (61) 665 2074 email: mariusz.winiecki@put.poznan.pl





# The University of Manchester, England,

offers an

# M.Sc by Distance Learning

h

# MAINTENANCE ENGINEERING & ASSET MANAGEMENT

This pert-time Mester's programme is taught fully on-line over a period of 3 years.

It offers professionals in the maintenance field the opportunity to develop their knowledge and sidils base whilst remaining in full-time employment

For further information visit our web site

### www.maintenance.org.uk

or contact us et: Maintenance Engineering Taught Programmes, School of Engineering, University of Manchester, Oxford Road, Manchester M13 9PL, England Tel : + 44 (0) 161 276 4398 Email: maintenance.igds@man.ac.uk

# FORMULARZ ZAMÓWIENIA PRENUMERATY KWARTALNIKA "EKSPLOATACJA I NIEZAWODNOŚĆ"

(wypełniony formularz proszę przesłać pocztą lub faxem na adres redakcji)

Nazwa firmy zamawiającej prenumeratę:

Adres:		
Telefon:	Fax:	 
Numer identyfikacyjny NIP:		

Zamawiam roczną prenumeratę kwartalnika PNTTE Warszawa i PAN O/Lublin pt: "Eksploatacji i Niezawodności" w ilości ...... egzemplarzy.

Cena rocznej prenumeraty 1 egzemplarza wynosi 100 złotych.

#### Adres do korespondencji:

(wypełnić jeżeli inny niż podany powyżej)

Imię i nazwisko:		
Nazwa:		
Adres:		
Telefon:	. Fax:	

Upoważniam Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne (Warszawa) do wystawienia na podstawie niniejszego zamówienia faktury VAT bez mojego podpisu.

Data: ...... Podpis osoby upoważnionej.....