

# MODELOWANIE STRUKTURALNEJ WARSTWY NOŚNEJ ŁOŻYSKA FOLIOWEGO

Jan KICIŃSKI\*, Grzegorz ŻYWICA\*, Romuald RZĄDKOWSKI\*\*, Marcin DREWZYŃSKI\*\*

\* Zakład Dynamiki Wirników i Łożysk Ślizgowych, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, ul. Fiszerka 14, 80-952 Gdańsk

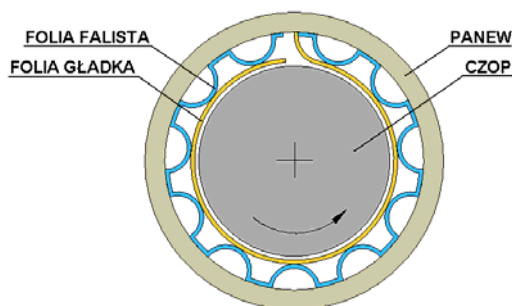
\*\* Zakład Aeroprężystości, Instytut Maszyn Przepływowych PAN, ul. Fiszerka 14, 80-952 Gdańsk

[kic@imp.gda.pl](mailto:kic@imp.gda.pl), [gzywica@imp.gda.pl](mailto:gzywica@imp.gda.pl), [z3@imp.gda.pl](mailto:z3@imp.gda.pl), [mdrew@imp.gda.pl](mailto:mdrew@imp.gda.pl)

**Streszczenie:** Łożyska foliowe dzięki swoim wielu zaletom znajdują w ostatnim czasie coraz więcej zastosowań. Dzisiejszy poziom wiedzy pozwala na modelowanie własności łożysk foliowych przede wszystkim na podstawie badań eksperymentalnych, gdyż dotychczas opracowane modele obliczeniowe nie pozwalają na otrzymanie wiarygodnych wyników. W niniejszej pracy przedstawiono wstępny etap prac nad modelowaniem strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego. Opracowano model dyskretny fragmentu folii gładkiej i falistej oraz przeprowadzono symulację komputerową pracy takiego układu. Otrzymany model numeryczny został następnie zweryfikowany eksperymentalnie. Uzyskano dużą zgodność wyników symulacji i eksperymentu, co świadczy o dużej przydatności opracowanego modelu w przewidywaniu własności łożysk foliowych.

## 1. WPROWADZENIE

W wielu współczesnych maszynach wirnikowych, w celu uzyskania pożądanego parametrów pracy, konieczne jest stosowanie wysokoobrotowych wirników. Prędkości wirowania wałów w takich urządzeniach nierzadko przekraczają 10 tys. obr/min, a czasem dochodzą nawet do 1 000 tys. obr/min. Dodatkowo, procesy przemiany energii zachodzące wewnątrz takich maszyn odbywają się najczęściej przy znacznych temperaturach wynoszących nawet kilkaset stopni Celsjusza. W takich warunkach klasyczne sposoby łożyskowania najczęściej zawodzą. Ze względu na szereg zalet najczęstszym typem łożysk stosowanych w tak trudnych warunkach są łożyska foliowe (Żywica, 2007a). Są one obecnie powszechnie stosowane np. wysokoobrotowych sprężarkach i turboekspanderach czy mikroturbinach (Agrawal, 1997). Rozważane są również inne, niekonwencjonalne zastosowania takich łożysk, jak chociażby do łożyskowania wałów okrętowych przy smarowaniu wodą (Olszewski i inni, 2007a). W tym przypadku istotną ich zaletą okazuje się możliwość kompensacji znacznych odchyłek montażowych i przekoszeń panwi.



Rys. 1. Podstawowe elementy łożyska foliowego

Pomimo, że łożyska foliowe są stosowane od wielu lat, badacze z całego świata wciąż napotykać znaczne problemy przy ich modelowaniu. Wynika to przede wszystkim z ich złożonej budowy, gdyż oprócz elementów znanych z klasycznych łożysk ślizgowych, kluczowym ich komponentem jest warstwa podatna rozpostarta pomiędzy czopem i panwią (rys. 1). Modelując taki układ należy więc uwzględnić sprzężenia zachodzące pomiędzy strukturalną oraz przepływową warstwą nośną łożyska. Dodatkowo, sytuację komplikuje fakt, że podczas rozruchu i wybiegu maszyny a także przy znacznych obciążeniach dynamicznych pomiędzy powierzchniami czopa oraz panwi występuje bezpośredni kontakt wymagający opisu innego niż w przypadku stabilnej pracy wirnika. Należy również zauważyć, że właściwości materiałów konstrukcyjnych (z których wykonana jest strukturalna warstwa nośna) oraz czynników smarnych w dużym stopniu zależą od temperatury, która w typowych warunkach pracy łożyska foliowego zmienia się w bardzo szerokim zakresie. Uwzględniając powyższe należy więc stwierdzić, że aby właściwie odwzorować pracę łożysk foliowych należy przeprowadzić złożoną, strukturalno-przepływową analizę numeryczną uwzględniającą zjawiska cieplne. Stopień złożoności tych zagadnień sprawia, że w niektórych publikacjach dotyczących łożysk foliowych rozbieżności pomiędzy wynikami uzyskanymi na podstawie eksperymentu i adekwatnej do niego symulacji dochodzą nawet do 500 % (Agrawal, 1997). Opracowanie adekwatnych do rzeczywistości modeli numerycznych jest w tym przypadku bardzo pożądane, szczególnie jeśli weźmiemy pod uwagę fakt, że nie da się właściwie zaprojektować i przewidzieć własności maszyny wirnikowej bez uwzględnienia charakterystyki łożysk. Obecnie opracowywane konstrukcje, w których skład wchodzi łożyska foliowe, wymagają więc przeprowadzenia

bardzo czasochłonnych i kosztownych badań eksperymentalnych. Opracowanie wiarygodnych modeli obliczeniowych mogłoby ten proces znacznie uprościć.

Badania nad łożyskami foliowymi prowadzone w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN dotyczą przede wszystkim konstrukcji, które w przyszłości będzie można zastosować w węzłach łożyskowych mikroturbin. Parametry pracy takich urządzeń wymuszają konieczność stosowania specjalnych rozwiązań konstrukcyjnych. Najważniejszymi zaletami łożysk foliowych (w odniesieniu do klasycznych łożysk ślizgowych oraz tocznych) w tym przypadku są: możliwość uzyskania znacznych prędkości obrotowych, możliwość pracy w szerokim zakresie temperatur, doskonałe tłumienie drgań, wysoka trwałość oraz łatwość obsługi. Najpoważniejszymi wadami tego typu łożysk są: niska nośność, mała dokładność osiowania, znaczne koszty opracowania, przebadania oraz wdrożenia nowych typów łożysk (które muszą być projektowane z uwzględnieniem charakterystyk roboczych konkretnej maszyny). Nawet wiodące firmy zajmujące się wytwarzaniem łożysk foliowych, do tej pory nie mają w swej ofercie gotowych katalogów, na podstawie których możliwy byłby zakup konkretnych modeli łożysk.

W dalszej części artykułu opisano pierwszy etap opracowywania modelu numerycznego łożyska foliowego. Polegał on na opracowaniu oraz weryfikacji modelu fragmentu strukturalnej warstwy nośnej takiego łożyska.

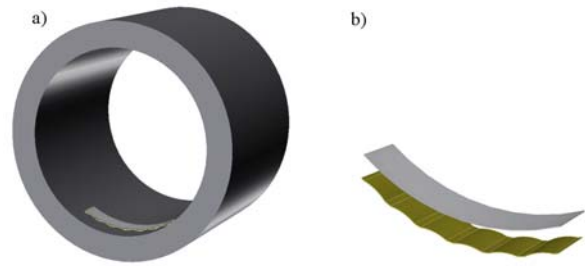
## 2. MODELOWANIE STRUKTURALNEJ WARSTWY NOŚNEJ ŁOŻYSKA FOLIOWEGO

W kolejnych podpunktach tej części artykułu zostały przedstawione wszystkie fazy powstawania trójwymiarowego modelu numerycznego fragmentu strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego. Do opracowania modelu wykorzystano komercyjny pakiet Metody Elementów Skończonych ABAQUS. W celu możliwie najlepszego odwzorowania rzeczywistego układu w modelu tym zostały uwzględnione zjawiska kontaktowe pomiędzy wszystkimi współpracującymi powierzchniami. Poza tym opracowany model został w pełni sparametryzowany, tak aby w przypadku konieczności analizy podobnych konstrukcji możliwa była bardzo szybka zmiana wszystkich wymiarów modelu.

### 2.1. Geometria modelu

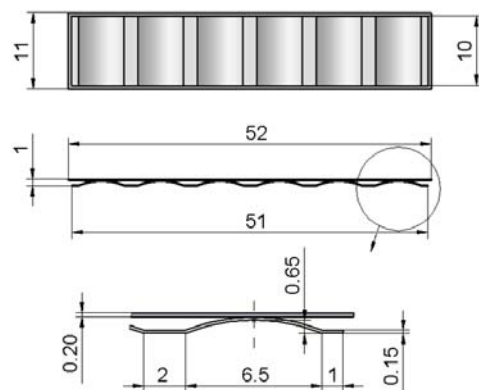
W pierwszym etapie prac nad opisem procesów zachodzących w łożysku foliowym zajęto się opracowaniem modelu strukturalnej warstwy nośnej. Ponieważ w łożyskach foliowych pierwszej generacji składa się ona z równomiernie rozmieszczonych po obwodzie panwi elementów sprężysto-tłumiących (na których opiera się folia gładka), w ramach wstępnych rozważań zajęto się wyłącznie fragmentem zespołu folii. Dodatkową przesłanką przemawiającą za takim podejściem jest fakt, że w przypadku łożysk o większych średnicach (rzędu kilkudziesięciu milimetrów) warstwa ta najczęściej składa się z cyklicznie rozmieszczonych po obwodzie zestawów kilku mniejszych folii falistych podpierających

folię gładką. Na sumaryczne własności zespołu folii wpływają więc w tym przypadku cechy każdego z pojedynczych fragmentów folii falistej. Poza tym ograniczenie wstępnego modelu strukturalnego wyłącznie do fragmentu warstwy nośnej łożyska pozwala na znacznie szybsze przeprowadzenie wielu obliczeń, w rezultacie których zostaną ustalone optymalne parametry dyskretyzacji. Na rysunku 2 przedstawiono umiejscowienie w panwi łożyskowej analizowanego fragmentu łożyska foliowego.



**Rys. 2.** Analizowany fragment łożyska foliowego  
(a - umiejscowienie w panwi,  
b - powiększony fragment folii falistej i gładkiej)

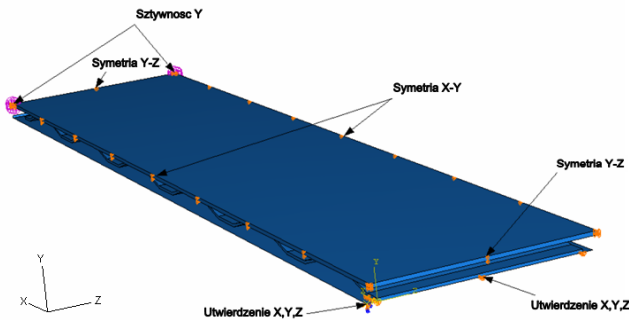
Grubość oraz kształt przedstawionej na powyższym rysunku folii zostały dobrane na podstawie pracy, w której przedstawiony był wstępny projekt łożyska foliowego (Hryniewicz i Wodke, 2006). Ponieważ w pracy tej poszczególnym wymiarom zostały przypisane jedynie wartości graniczne, do badań przyjęto jedno z możliwych rozwiązań, którego parametry mieszczą się w zakresie zaproponowanych wartości. Podstawowe wymiary analizowanego fragmentu folii przedstawiono na rysunku 3. Przyjęto, że obie folie wykonane są ze stali o właściwościach:  $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$ ,  $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$ ,  $\nu = 0,3$ . Obliczenia symulacyjne zostały przeprowadzone dla modelu, w którym zaniebano krzywiznę panwi. Jest to podejście dość często spotykane w literaturze zagadnienia (Hryniewicz i Wodke, 2007; Lez i inni, 2007; Ku i Heshmat 1992, 1993). Dodatkowo, wyniki badań własnych potwierdzają jedynie niewielki wpływ krzywizny na wyniki obliczeń w zakresie odkształceń.



**Rys. 3.** Podstawowe wymiary przyjętego do analizy fragmentu strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego

## 2.2. Warunki brzegowe

Podczas opracowywania modeli numerycznych niezwykle ważnym zagadnieniem jest przyjęcie właściwych warunków brzegowych. W dużym stopniu decydują one bowiem o podobieństwie modelu do układu rzeczywistego. W przypadku rozważanego fragmentu zespołu folii konieczne było odebranie takiej liczby stopni swobody, aby nie dopuścić do możliwości wystąpienia ruchu sztywnego jego elementów, a z drugiej strony nie ograniczyć niezbędnych deformacji modelu. Na rysunku 4 przedstawiono model z zastosowanymi warunkami brzegowymi.



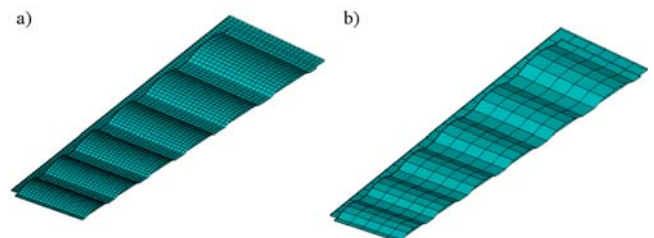
Rys. 4. Model fragmentu zespołu folii z warunkami brzegowymi

Na krawędziach folii gładkiej wprowadzono więzy symetryczności. W celu ograniczenia przemieszczeń folii gładkiej jako bryły sztywnej w kierunku osi Y, w czterech punktach znajdujących się na jednym jej końcu zadano sztywność o wartości 25 N/m. Sumaryczna sztywność w kierunku osi Y wynosiła więc 100 N/m i była zbliżona do wartości wyznaczonej w trakcie dodatkowych obliczeń (Żywica, 2007b). Powierzchnia panwi łożyskowej, na której rozpostarta jest folia falista, została zamodelowana jako nieskończenie sztywna i utwardzona przy pomocy związanego z nią punktu referencyjnego (ABAQUS Inc, 2004). Założenie sztywnej panwi jest w tym przypadku jak najbardziej uzasadnione, gdyż w odniesieniu do zespołu folii wykazuje ona tylko nieznaczne odkształcenia. Potwierdzają to wyniki dotychczasowych badań (Żywica, 2007b; Rządkowski i inni, 2007a). Przemieszczenia jednego końca folii falistej zostały ograniczone poprzez odebranie wszystkich stopni swobody (tj. sztywne połączenie z panwią). W rzeczywistej konstrukcji koniec ten jest również trwale połączony z panwią łożyska. Pomiędzy górną powierzchnią folii falistej oraz dolną powierzchnią folii gładkiej, a także pomiędzy dolną powierzchnią folii falistej oraz górną powierzchnią panwi zamodelowano kontakt (opcja "Surface-to-Surface Contact" w systemie ABAQUS). Wartość współczynnika tarcia została ustalona na podstawie literatury, gdzie podano jego wartości dla różnych materiałów, którymi pokrywa się blachy stalowe wykorzystywane do wytwarzania łożysk foliowych (Olszewski i inni, 2007b). Na podstawie wyników eksperymentu można stwierdzić, że w przypadku tarcia bez smarowania wartość współczynnika tarcia oscyluje w granicach 0,04 - 0,016. Do wstępnych rozważań przyjęto więc współczynnik tarcia o wartości  $\mu = 0,1$ .

Nośność łożysk gazowych w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego waha się w granicach 0,1 - 0,7 MPa. W łożyskach foliowych smarowanych cieczami, maksymalne ciśnienie w klinie smarnym najczęściej nieznacznie przekracza wartość 1 MPa (Hryniewicz i Wodke, 2006). Wobec powyższego, górną powierzchnię folii gładkiej obciążono ciśnieniem, którego wartość maksymalna wynosiła 1 MPa.

## 2.3. Dyskretyzacja modelu

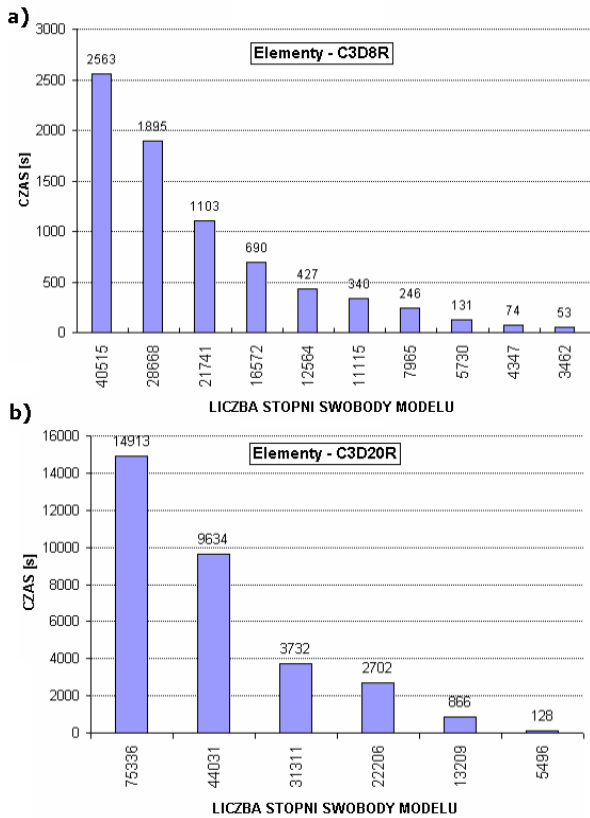
Celem znalezienia najlepszego sposobu dyskretyzacji modelu przeprowadzono optymalizację siatki MES. Podstawowym kryterium podczas optymalizacji była duża dokładność uzyskiwanych wyników przy możliwie krótkim czasie obliczeń. Na wstępnym etapie opracowywania modelu numerycznego ma to bardzo duże znaczenie, gdyż wnioski wyciągnięte na podstawie tych badań zostaną wykorzystane przy tworzeniu modelu uwzględniającego całą strukturalną warstwę nośną łożyska foliowego. Ponieważ celem niniejszej pracy było opracowanie trójwymiarowego modelu zespołu folii, rozważania ograniczono do bryłowych elementów skończonych. Podczas optymalizacji siatki numerycznej uwzględniano elementy skończone z liniowymi (C3D8R) jak i kwadratowymi (C3D20R) funkcjami kształtu (ABAQUS Inc, 2004). W obu przypadkach badano wpływ zagęszczenia siatki MES na czas oraz dokładność uzyskiwanych wyników. Na poniższym rysunku (rys. 5) przedstawiono dwa skrajne przypadki dyskretyzacji modelu.



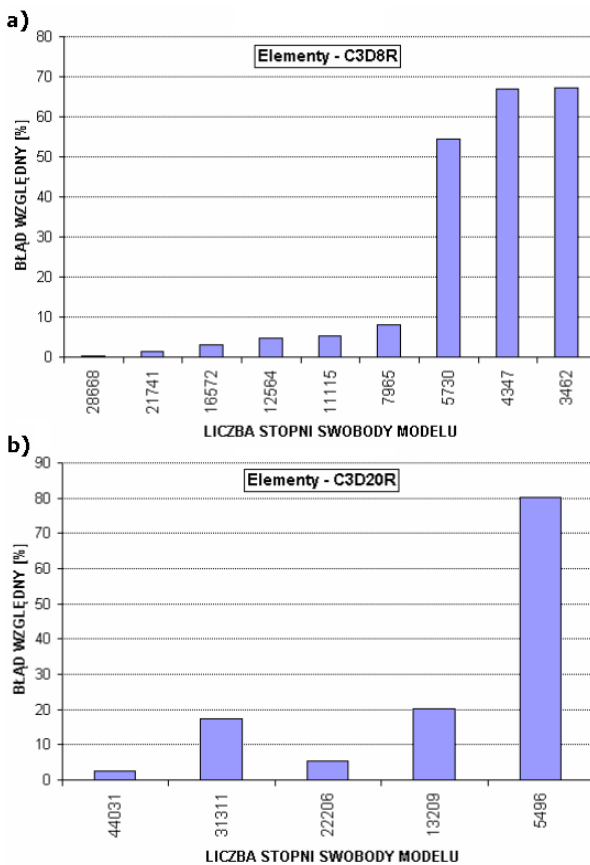
Rys. 5. Dwa skrajne warianty dyskretyzacji modelu

(a - model o największej liczbie elementów skończonych,  
b - model o najmniejszej liczbie elementów skończonych)

Przeprowadzone badania potwierdziły ogromny wpływ rodzaju oraz wielkości elementów skończonych na dokładność oraz czas obliczeń symulacyjnych. Na rysunku 6 przedstawiono wykresy obrazujące wpływ liczby stopni swobody modelu oraz rodzaj zastosowanego elementu skończonego na całkowity czas obliczeń. Podczas tych obliczeń zespół folii był obciążany statycznie ciśnieniem o wartości 1 MPa. Na kolejnym rysunku (rys. 7) przedstawiono wyniki w zakresie dokładności obliczeń. Wyniki te dotyczą błędów wyznaczenia przemieszczeń wybranego punktu, zlokalizowanego na powierzchni folii gładkiej. Jako wartości bazowe przy wyznaczaniu błędów względnych wykorzystano wartości otrzymane dla modeli o największej liczbie stopni swobody.



Rys. 6. Czas obliczeń w zależności od ilości stopni swobody modelu oraz rodzaju elementu skończonego



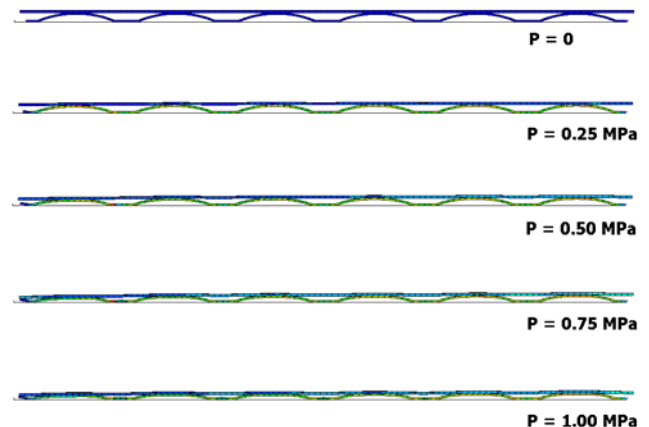
Rys. 7. Błąd względny obliczeń w zależności od liczby stopni swobody modelu oraz rodzaju elementu skończonego

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że w przypadku elementów skończonych z liniowymi funkcjami kształtu optymalny model składał się z 12 564 stopni swobody. Czas obliczeń dla tego modelu wynosił 427 sekund, a błąd względny w odniesieniu do wariantu o największej liczbie stopni swobody nie przekroczył 5%. Dla elementów z funkcjami kształtu drugiego stopnia optymalnym rozwiązaniem wydaje się być model składający się z 22 206 stopni swobody. Błąd obliczeń w tym przypadku nieznacznie przekroczył 5%, a obliczenia trwały 2 702 sekundy. Należy jednak zauważyć, że dla elementów C3D20R zwiększenie liczby stopni swobody nie zawsze wiązało się z poprawą dokładności wyników. Świadczy to o pewnego rodzaju niestabilności rozwiązania.

Podsumowując zagadnienie dyskretyzacji modelu należy stwierdzić, że elementy z liniowymi funkcjami kształtu (C3D8R) w przypadku analizy zespołu folii wykazały się większą użytecznością. Model zdyskretyzowany przy ich użyciu pozwalał na uzyskanie dużej dokładności wyników przy dość krótkim czasie obliczeń. Potwierdza to dokumentacja systemu ABAQUS, gdyż elementy C3D8R są zalecane do przeprowadzania analiz uwzględniających zjawiska kontaktowe.

#### 2.4. Wyniki obliczeń

Przedstawione w tej części artykułu wyniki obliczeń odnoszą się do modelu zdyskretyzowanego przy pomocy elementów skończonych z liniowymi funkcjami kształtu o największej, z analizowanych w poprzednim podpunkcie, gęstości siatki numerycznej. Prezentowane poniżej wyniki zostały uzyskane podczas optymalizacji siatki numerycznej, nie było więc potrzeby przeprowadzania dodatkowych obliczeń z zastosowaniem modelu optymalnego. Będzie on jednak wykorzystany podczas weryfikacji modelu oraz w czasie dalszych prac, w ramach których zostanie opracowany model całej strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego.

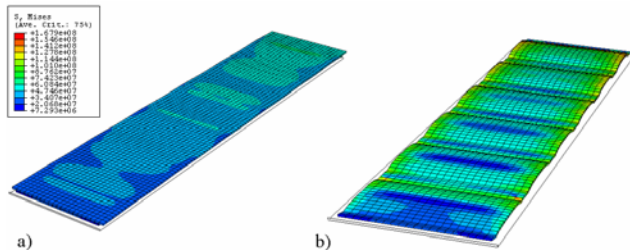


Rys. 8. Kolejne etapy odkształcenia zespołu folii.

Powyżej przedstawiono kolejne etapy odkształcenia zespołu folii, wywołanego ciśnieniem działającym na górną powierzchnię folii gładkiej (rys. 8). Na przedstawionym



rysunku wyraźnie widoczne są, oprócz odkształceń zgodnych z kierunkiem działania obciążenia, przemieszczenia folii falistej wzdłuż powierzchni panwi. Dzięki wzajemnemu przemieszczaniu się folii i występującym przy tym zjawisku tarcia, podczas pracy łożysk foliowych znaczna część energii drgań układu jest rozpraszana. Zjawisko to jest korzystne, gdyż zapobiega pojawianiu się drgań spowodowanych występowaniem zbyt niskiego tłumienia w układzie czop - panew.

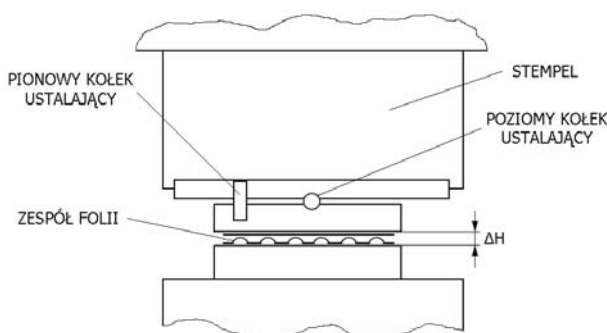


Rys. 9. Rozkłady naprężeń na powierzchniach elementów zespołu folii (a - folia gładka, b - folia falista)

Na rysunku 9 przedstawiono rozkłady naprężeń zredukowanych (Hubera - Misesa) na górnych powierzchniach folii gładkiej i falistej przy maksymalnym obciążeniu. Na rysunku tym możemy zauważyć, że największe naprężenia występują na krawędziach folii falistej. Ich wartość nie przekracza jednak naprężeń dopuszczalnych, nie spowodowałyby więc uszkodzenia rzeczywistej konstrukcji.

### 3. WERYFIKACJA MODELU

Do weryfikacji modelu numerycznego zespołu folii wykorzystano wyniki eksperymentu przeprowadzonego przez amerykańskich badaczy (Ku i Hashmat, 1992, 1993). Podczas doświadczenia, zespół folii obciążony był równomiernie stemplem stalowym. W trakcie stopniowego obciążania układu mierzona była siła nacisku stempla oraz jego przemieszczenie. Schemat stanowiska pomiarowego wykorzystanego do przeprowadzenia eksperymentu przedstawiono na rysunku 10.

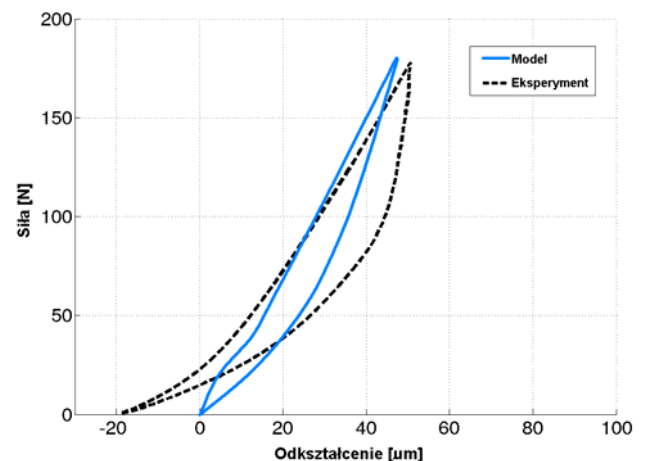


Rys. 10. Schemat stanowiska wykorzystanego podczas eksperymentu.

Wymiary rozważanego fragmentu zespołu folii, przedstawionego w poprzedniej części artykułu, zostały dostosowane do wymiarów układu przebadanego eksperymentalnie. Było to możliwe dzięki pełnej

parametryzacji modelu. Podstawowe wymiary zespołu folii wynosiły: podziałka wypukłości folii falistej  $s = 4,2$  mm, rozpiętość wypukłości  $L = 3,4$  mm, wysokość wypukłości  $h = 0,47$  mm, grubość blachy folii falistej  $t = 0,076$  mm, szerokość zespołu folii  $B = 24,1$  mm (Rządkowski i inni, 2007b). Folia falista posiadała 6 wypukłości. Zmiana wymiarów nie wpłynęła na omówione wcześniej warunki brzegowe oraz sposób dyskretyzacji modelu. Pomimo że weryfikacji poddano konkretny wariant konstrukcyjny, przeprowadzone badania umożliwiają wyciągnięcie wniosków ogólnych odnośnie zastosowanej metody modelowania zespołu folii. W przypadku potrzeby modelowania innych, podobnych rozwiązań konstrukcyjnych konieczna byłaby jedynie zmiana kilku parametrów geometrycznych, natomiast idea modelowania zespołu folii pozostałaby taka sama.

Na rysunku 11 przedstawiono porównanie wyników eksperymentu oraz adekwatnej do niego symulacji komputerowej. Zarówno podczas eksperymentu jak i symulacji zespół folii był obciążony siłą pionową o wartości maksymalnej równej 180 N. Podczas pełnego cyklu obciążania oraz odciążania układu rejestrowano jego odkształcenia.



Rys. 11. Porównanie wyników symulacji i eksperymentu

Na podstawie przedstawionego na rysunku 11 porównania można stwierdzić, że pomimo braku niektórych informacji na temat rzeczywistego obiektu (np. dokładnej wartości współczynnika tarcia) uzyskano bardzo dużą zgodność wyników symulacji z eksperymentem. Największe niezgodności, występujące przy małym obciążeniu układu, związane są z występowaniem niedokładności powierzchni oraz geometrii rzeczywistych folii. Dopiero pewne obciążenie układu rzeczywistego powoduje pozbycie się luzów wynikających z tych niedokładności. Inny przebieg krzywej charakteryzującej odkształcenie układu podczas obciążania oraz odciążania jest charakterystyczny dla układów sprężystych, w których mamy do czynienia z rozpraszaniem energii. W analizowanym modelu energia układu jest tracona na pokonanie oporów tarcia występującego pomiędzy współpracującymi elementami. W przypadku łożysk foliowych jest to zjawisko korzystne i zazwyczaj dąży się do uzyskania jak największego pola obrazującego straty

energii (pętli histerezy). Należy zwrócić jeszcze uwagę na fakt, że porównania wyników dokonano jedynie w dość małym zakresie obciążeń i odkształceń. Podczas dalszego obciążania układu charakterystyka przyjęłaby postać wyraźnie nieliniową (Kiciński i Żywica, 2007). Mogłoby to stać się przyczyną dodatkowych trudności w uzyskaniu zgodności obu charakterystyk.

#### 4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono pierwszy etap prac nad modelowaniem łożysk foliowych. Polegał on na opracowaniu modelu MES fragmentu strukturalnej warstwy nośnej łożyska. Przedstawiono kolejne fazy opracowywania trójwymiarowego modelu uwzględniającego zjawiska kontaktowe zachodzące w rzeczywistej konstrukcji. W ramach badań przeprowadzono także optymalizację siatki MES. W wyniku przeprowadzenia całej serii obliczeń ustalono optymalny pod względem dokładności wyników oraz czasu obliczeń sposób dyskretyzacji modelu. Przeprowadzono również weryfikację eksperymentalną technik zastosowanych przy opracowywaniu modelu. Jak się okazało, uzyskane symulacyjnie wyniki w zakresie statycznych odkształceń zespołu folii doskonale pokrywają się z wynikami eksperymentu. Było to możliwe dzięki trafnemu uwzględnieniu najważniejszych zjawisk występujących w układzie rzeczywistym. Wyniki obliczeń uzyskanych przy pomocy komercyjnego pakietu MES należy więc uznać z satysfakcjonujące.

Techniki zastosowane przy opracowywaniu modelu fragmentu strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego zostaną wykorzystane przy opracowywaniu pełnego modelu rozważanego układu. Będzie on uwzględniał wszystkie elementy warstwy podatnej łożyska złożonej z wielu odkształcalnych folii falistych i rozpostartej na nich folii gładkiej. Przy opracowywaniu tego modelu wykorzystane zostaną również doświadczenia nabyte podczas optymalizacji siatki numerycznej, co pozwoli na zastosowanie najkorzystniejszego pod względem czasu oraz dokładności obliczeń sposobu dyskretyzacji. Ostatnim etapem opracowywania modelu pełnego łożyska foliowego będzie uwzględnienie przepływowej warstwy nośnej oraz zamodelowanie interakcji zachodzących pomiędzy płynem i strukturą łożyska.

#### LITERATURA

1. **ABAQUS Inc** (2004), *ABAQUS Analysis User's Manual*, Version 6.5.
2. **Agrawal G. L.** (1997), Foil Air/Gas Bearing Technology - An Overview, *International Gas Turbine & Aero engine Congress & Exhibition 1997*, Orlando.
3. **Hryniewicz P., Wodke M.** (2006), *Wykonanie wstępnego projektu łożyska foliowego smarowanego wodą i sparametryzowanie jego wymiarów*, Opracowanie wew. IMP PAN nr arch. 6656/06, Gdańsk.

4. **Hryniewicz P., Wodke M.** (2007), *Wykonanie obliczeń strukturalnych łożyska foliowego oraz dobór optymalnych parametrów numerycznych modelu*, Praca niepublikowana wykonana w ramach projektu badawczego Nr 1683/T07/05/29, Gdańsk.
5. **Kiciński J., Żywica G.** (2007), *Badanie wpływu wybranych parametrów zespołu folii falistych na charakterystyki statyczne i dynamiczne strukturalnej warstwy nośnej łożyska foliowego*, Opracowanie wew. IMP PAN nr arch. 7295/07, Gdańsk.
6. **Ku R., Heshmat H.** (1992), Compliant Foil Bearing Structural Stiffness Analysis: Part I - Theoretical Model Including Strip and Variable Bump Foil Geometry, *ASME Journal of Tribology*, Vol. 114, 394-400.
7. **Ku R., Heshmat H.** (1993), Compliant Foil Bearing Structural Stiffness Analysis: Part II - Experimental Investigation, *ASME Journal of Tribology*, Vol. 115, 364-369.
8. **Lez S. L., Arghir M., Frane J.** (2007), Static and Dynamic Characterization of a Bump-Type Foil Bearing Structure, *ASME Journal of Tribology*, Vol. 129, 75-83.
9. **Olszewski A., Wodke M., Hryniewicz P.** (2007a), Ekologiczne łożysko foliowe smarowane wodą - budowa i analiza wybranych parametrów konstrukcyjnych na sztywność podparcia łożyska, *Tribologia*, nr 1/2007.
10. **Olszewski A., Wodke M., Hryniewicz P.** (2007b), Powłoki fluoropolimerowe oraz przeciwтарыowe w łożyskach foliowych smarowanych wodą, *Tribologia*, nr 1/2007.
11. **Rządkowski R., Drewczyński M., Kwapisz L., Soliński M.** (2007a), *Opracowanie modelu strukturalnego warstwy nośnej łożyska foliowego, Część I: Model numeryczny*, Opracowanie wew. IMP PAN nr arch. 7201/07, Gdańsk.
12. **Rządkowski R., Drewczyński M., Kwapisz L., Soliński M.** (2007b), *Opracowanie modelu strukturalnego warstwy nośnej łożyska foliowego, Część II: Weryfikacja eksperymentalna modelu*, Opracowanie wew. IMP PAN nr arch. 7201/07, Gdańsk.
13. **Waumans T., Vleugels P., Peirs J., Al-Bender F., Reynaerts D.** (2006), Rotordynamic behaviour of a micro-turbine rotor on air bearings: modelling techniques and experimental verification, *Proceedings of ISMA 2006*, 181-198.
14. **Żywica G.** (2007a), *Analiza rozwiązań konstrukcyjnych mikrołożysk dostępnych w literaturze i katalogach firm*, Opracowanie wew. IMP PAN nr arch. 7171/07, Gdańsk.
15. **Żywica G.** (2007b), *Wyznaczenie zastępczej sztywności warstwy nośnej łożyska foliowego*, Opracowanie wew. IMP PAN w Gdańsku nr arch. 7172/07, Gdańsk.

#### NUMERICAL MODELLING OF THE STRUCTURAL LAYER OF FOIL BEARING

**Abstract:** Foil bearings fulfil most of the requirements of novel oil-free turbomachinery. Only the experimental investigation of foil bearings giving us the fundamental knowledge of their behaviour, because of the lack of good numerical models. This work presented the preliminary stage of numerical modelling of the structural layer of foil bearing. The FEM model of bump and top foil was prepared and mutual motion was analyzed. The results of FEM model were verified experimentally. A good agreement between numerical simulation and experiment was obtained.

Praca została sfinansowana ze środków sieci naukowej Eko-Energia na rok 2007.