MECHANIKA
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
MECHANICS
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
4-M/2011
ZESZYT 7
ROK 108
ISSUE 7
YEAR 108

MICHAŁ HAWRYLUK, EDWARD LISOWSKI*

BADANIA SYMULACYJNE USZCZELNIENIA SIŁOWNIKA HYDRAULICZNEGO Z WYKORZYSTANIEM SYSTEMU ANSYS

SIMULATION TESTS OF HYDRAULIC CYLINDER SEALING BY THE MEANS OF ANSYS SYSTEM

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych elastomerowego pierścienia uszczelniającego typu U. Do badań MES wykorzystano pakiet ANSYS. Jako dane wejściowe do symulacji wykorzystano wyniki uprzednio wykonanych badań materiałowych w podwyższonych temperaturach. Przeprowadzone symulacje pozwalają na oszacowanie przecieku dla różnych warunków pracy uszczelnienia oraz mogą być użyteczne w pracach związanych z procesami zużycia elastomerowych pierścieni uszczelniających.

Słowa kluczowe: *uszczelnienia siłowników hydraulicznych, wyznaczanie przecieku*

Abstract

The paper presents the results of FE analysis of an U-type elastomeric sealing ring. For the analysis ANSYS system was used. As an input for the simulation, data from previously conducted material characterization tests was used (tests were performed in the elevated temperatures). The achieved results allow to predict leakage rate for different operating conditions, and can also be useful in studies concerning wearing processes of elastomeric sealing rings.

Keywords: *hydraulic cylinder sealing, leakage estimation*

* Mgr inż. Michał Hawryluk, prof. dr hab. inż. Edward Lisowski, Instytut Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Siłowniki hydrauliczne znajdują szerokie zastosowanie w układach napędowych maszyn i urządzeń. Jednym z głównych kierunków rozwoju siłowników hydraulicznych jest system uszczelniający, w szczególności węzeł uszczelniający tłoczyska. Rozwój ukierunkowany jest na wyeliminowanie przecieku oleju do środowiska, redukcję oporów ruchu oraz wydłużenie czasu pracy węzła uszczelniającego. Odpowiednie zaprojektowanie oraz poprawny montaż elementów układów uszczelniających zapewniają wysoką trwałość i niezawodność uszczelnień. Jest to bardzo istotne, zwłaszcza gdy w użyciu pozostaje duża liczba maszyn i urządzeń z napędem hydraulicznym.

Ostatnie lata pokazują, że ważnym czynnikiem, który musi być brany pod uwagę już na etapie projektowania, jest ochrona środowiska. W związku z wdrażaniem nowych materiałów i technologii oraz nowego rodzaju uszczelnień (nowe kształty), przecieki oleju hydraulicznego są ciągle redukowane, niemniej jednak rozwój często wymaga wielu badań eksperymentalnych, które są czasochłonne i kosztowne.

W artykule przedstawiono wyniki analizy MES popularnego elastomerowego pierścienia uszczelniającego typu U. W analizie uwzględniono wpływ temperatury oleju na pracę uszczelnienia (w stanie ustalonym temperatura oleju może dochodzić nawet do ok. 70–80°C). W kolejnych rozdziałach omówiono procedurę symulacji. Została także przedstawiona metoda oceny przecieku oparta na wynikach analiz MES oraz teorii IHL (ang. Inverse Hydrodynamic Lubrication).

Narzędzia CAE, takie jak wykorzystane w niniejszym artykule, pozwalają inżynierom na bardziej efektywne projektowanie elementów uszczelniających, redukując ryzyko związane z wielokrotnym wykonywaniem prototypów i badań eksperymentalnych.

Często zdarza się także, że bardzo wymagający jest proces doboru materiału do danego węzła uszczelniającego. Proces ten, który często był uzależniony od wiedzy i doświadczenia inżynierów, dostępnej technologii itp., może być obecnie wspomagany na etapie projektowania przy użyciu narzędzi symulacyjnych CAE.

2. Analiza MES pierścienia uszczelniającego

Badaniom symulacyjnym (MES) poddany został pierścień uszczelniający typu U dla tłoczyska o średnicy 36 mm (rys. 1) wykonany z materiału NBR (ang. Nitrile Buradiene Rubber).

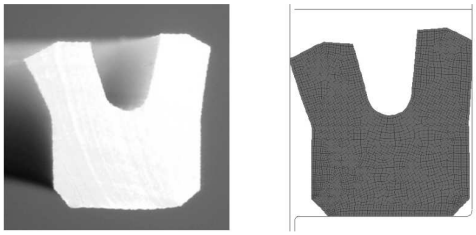
Materiały gumopodobne takie jak NBR należą do grupy materiałów hipersprężystych. Analizy związane z tego rodzaju materiałami mogą stanowić skomplikowany problem z inżynierskiego punktu widzenia. Nieliniowości materiałowe, duże przemieszczenia oraz tarcie wymagają specjalnych narzędzi do rozwiązania zadania.

Analizy MES przedstawione w artykule zostały wykonane z wykorzystaniem systemu ANSYS. Do opisu materiału elastomerowego użyty został model materiału hipersprężystego Mooneya-Rivlina o pięciu parametrach. Współczynniki modelu przyjęto na podstawie wyników prób ściskania próbek walcowych w podwyższonych temperaturach (20, 50 oraz 80°C). Pozostałe parametry, takie jak przewodność cieplna oraz współczynnik rozszerzalności cieplnej zostały przyjęte z literatury.

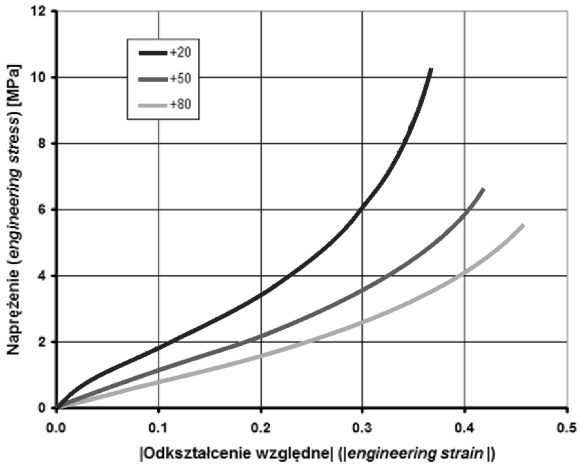
Model wykonano jako plik wsadowy (APDL) do systemu ANSYS. Do analizy przyjęto dwuwymiarowy osiowosymetryczny model pierścienia uszczelniającego. Geometria

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

tłoczyska, dławnicy oraz pierścienia uszczelniającego została sparametryzowana, co pozwala na łatwą modyfikację modelu. Dławnicę oraz tłoczysko zamodelowano z użyciem elementów nieodkształcalnych.



Rys. 1. Przekrój badanego pierścienia uszczelniającego (przed montażem) oraz odpowiadający mu model dyskretny
Fig. 1. Investigated sealing ring cross-section (before installation) and corresponding FE model



Rys. 2. Wyniki próby ściskania NBR w podwyższonych temperaturach
Fig. 2. Results of NBR compression tests in elevated temperatures

Efekt samouszczelnienia pierścienia elastomerowego wymaga występowania wstępnego zacisku montażowego pomiędzy pierścieniem uszczelniającym a tłoczyskiem. W związku z tym proces montażu, jak i warunki pracy mają znaczny wpływ na zachowanie uszczelnienia.

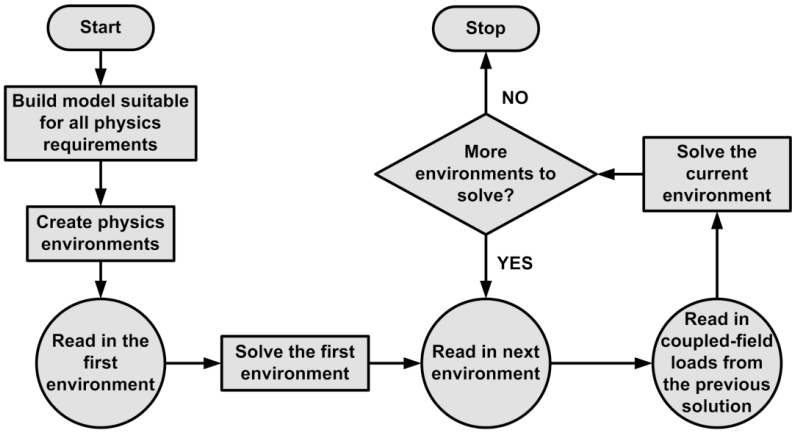
Wstępny zacisk montażowy został zasymulowany przez osiowe przemieszczenie tłoczyska i ściany rowka dławnicy. Takie podejście zapewnia dobrą kontrolę nad całością procesu wstępnego zacisku. W związku z występowaniem dużych przemieszczeń w trakcie montażu oraz w procesie obciążania, przemieszczenie montażowe oraz ciśnienie robocze zadane zostało w serii kroków obciążenia. Bezpośrednie obciążenie może prowadzić bowiem do problemów ze zbieżnością i niestabilności rozwiązania.

W celu uwzględnienia efektów związanych z wpływem temperatury wymagane jest przeprowadzenie sprzężonej analizy termo-mechanicznej. W systemie ANSYS do wy-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

konywania analiz sprzężonych wprowadzono koncepcję środowisk fizycznych (ang. physics environment).

Na rysunku 3 przedstawiono przepływ danych w sprzężonej analizie z wykorzystaniem środowisk fizycznych. Pojedyncza baza danych zawiera elementy oraz węzły dla wszystkich analiz, które będą wykonywane, natomiast parametry poszczególnych analiz ulegają zmianie pomiędzy środowiskami [8].

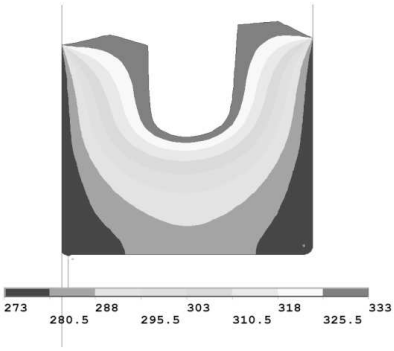


Rys. 3. Schemat blokowy przepływu danych w analizie sprzężonej [7]
Fig. 3. Block diagram of a data flow in coupled-fields analysis [7]

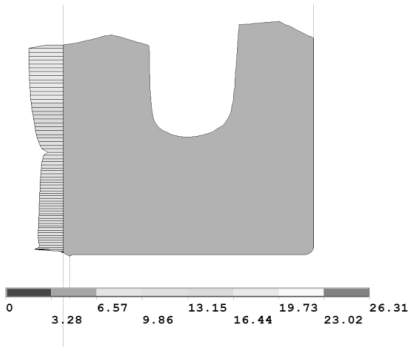
Siatkę wykonano z użyciem elementów PLANE182 (2-D 4-węzłowe czworokątne).

W zaprezentowanym modelu pominięto efekty związane z cyklicznym obciążaniem i odciążaniem pierścienia.

Na rysunkach 4 oraz 5 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane z przeprowadzonej analizy (rozkład temperatury na przekroju pierścienia oraz rozkład nacisków pomiędzy pierścieniem uszczelniającym a tłoczyskiem przy obciążeniu to 16 MPa).



Rys. 4. Rozkład temperatury na przekroju pierścienia [K]
Fig. 4. Temperature distribution over sealing ring cross-section [K]



Rys. 5. Rozkład nacisków pomiędzy uszczelnieniem a tłoczyskiem [MPa]
Fig. 5. Contact pressure distribution between sealing ring and piston rod [MPa]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

3. Ocena przecieków

Metoda oceny przecieku przedstawiona w artykule oparta jest na rozwiązaniu odwrotnego problemu smarowania hydrodynamicznego (IHL) [6]. Rozkład ciśnienia oleju w szczelinie uszczelnianej utożsamia się z rozkładem nacisków wynikających z czysto mechanicznego kontaktu pomiędzy pierścieniem uszczelniającym a tłoczyskiem. Pomija się efekty związane z wpływem powstającego filmu smarnego na geometrię szczeliny. Podejście tego rodzaju uważane jest za użyteczne w zastosowaniach wysokociśnieniowych, takich jak zaprezentowano w niniejszym artykule [1, 2, 3, 5].

Podstawą rozwiązania odwrotnego problemu smarowania hydrodynamicznego jest odpowiednio przekształcone równanie Reynoldsa dla przypadku przepływu jednoosiowego.

Przeciek może zostać wyliczony na postawie szerokości szczeliny uszczelnianej w punkcie, w którym ciśnienie osiąga maksymalną wartość [6, 7]. W tym przypadku obowiązuje następująca zależność:

$$h_{id0/od0} = 0,94\left[\frac{\eta u_{i/o}}{\left(\frac{dp}{dx}\right)_{\max i/o}}\right]^{0,5} \tag{1}$$

Indeksy *i/o* w równaniu (1) wskazują rozważany kierunek ruchu tłoczyska (odpowiednio wsuw i wysuw tłoczyska siłownika), $(dp/dx)_{\max}$ jest maksymalnym gradientem ciśnienia, η – lepkość dynamiczna, *u* – prędkość ruchu tłoczyska.

Badania doświadczalne zaprezentowane w pracy [1] wykazały, że w przypadku nowoczesnych uszczelnień przeznaczonych do pracy przy wysokich ciśnieniach gradienty nacisków statycznych i dynamicznych nie wykazują znaczących różnic przy obu kierunkach ruchu tłoczyska.

Rozkład prędkości płynu w szczelinie, w miejscu, w którym ciśnienie osiąga maksymalną wartość, jest liniowy. Poza szczeliną prędkość płynu ma stałą wartość równą $u_{i/o}$ dlatego przy założeniu ciągłości przepływu można wyliczyć grubość filmu smarnego na tłoczysku:

$$h_{i/o} = \frac{1}{2} h_{id0/od0} \tag{2}$$

Przy założeniu $h_i < h_o$, przeciek po *N* cyklach może zostać wyznaczony z zależności:

$$V = N\pi dL(h_o - h_i) = N\pi dL\sqrt{\frac{2}{9}\eta}\left[\sqrt{\frac{u_o}{\left(\frac{dp}{dx}\right)_{\max o}}} - \sqrt{\frac{u_i}{\left(\frac{dp}{dx}\right)_{\max i}}}\right] \tag{3}$$

gdzie:

d – średnica tłoczyska,
L – skok.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

4. Wnioski

W artykule zaprezentowano wyniki badań MES popularnego elastomerowego pierścienia uszczelniającego typu U. Uwzględniono podstawowe efekty związane z wysoką temperaturą oleju w stanie ustalonym. Przedstawiono metodę oceny przecieków, opierając się na wynikach analiz MES i rozwiązanie odwrotnego problemu smarowania hydrodynamicznego (IHL).

W większości publikacji dotyczących oceny przecieków uszczelnień siłowników hydraulicznych przy użyciu teorii IHL, rozkłady nacisków otrzymuje się nie przy użyciu metod symulacyjnych lecz jako wynik żmudnych badań doświadczalnych. Zaawansowane modele, które będą w odpowiedni sposób odzwierciedlać warunki rzeczywiste mogą z całą pewnością skutkować rozwojem techniki uszczelnień.

Przygotowany model oraz otrzymane wyniki mogą być wykorzystane w przyszłości w bardziej rozbudowanych analizach także tych związanych z procesami zużycia uszczelnień.

Literatura

[1] Bisztray Balku S., *Design Development and Tribology of Reciprocating Hydraulic Seals*, Periodica Polytechnica, Ser. Mech. Eng., Vol. 47, No. 1, Budapest 2004, 163-178.

[2] Bisztray Balku S., *Tribology of Elastomeric and Composite Reciprocating Hydraulic Seals*, Periodica Polytechnica, Ser. Mech. Eng., Vol. 43, No. 1, Budapest 1999, 63-80.

[3] Bisztray Balku S., *Development and Tribology of Reciprocating Hydraulic Seals*, Proceedings of 5th International Multidisciplinary Conference, Baia Mare 2003.

[4] Hawryluk M., *The Estimation of Oil Leakage in Hydraulic Cylinders Using FEM*, Czasopismo Techniczne, 2-M/2010, Wydawnictwo PK, Kraków 2010.

[5] Kanters A.F.C., *On the Calculation of Leakage and Friction of Reciprocating Elastomeric Seals*, PhD Thesis, TU Eindhoven, Eindhoven 1990.

[6] Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie*, PWN, Warszawa 1993.

[7] Zagól W., *Wpływ obniżonej temperatury otoczenia na skuteczność uszczelnień w siłownikach hydraulicznych maszyn roboczych*, praca doktorska, Wydawnictwo PK, Kraków 2003.

[8] ANSYS Coupled-Field Analysis Guide, SAS IP Inc. 2005.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ