

Leszek GRABKA*, Stanisław SZWEDA*

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW TRIBOLOGICZNYCH CHARAKTERYZUJĄCYCH WSPÓŁPRACĘ ELASTOMEROWEGO PIERŚCIENIA USZCZELNIAJĄCEGO Z WAŁEM

IDENTIFICATION OF TRIBOLOGICAL PARAMETERS CHARACTERIZING COOPERATION ROTARY SEAL WITH THE SURFACE OF THE SHAFT

Key words:

seal, rotary seal, shaft surfaces, investigation, dimensional analysis

Słowa kluczowe:

uszczelnienie, pierścień elastomerowy, warstwa wierzchnia wału, badania stanowiskowe, analiza wymiarowa

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono propozycję opisu, dotychczas w małym stopniu rozeznanych, zjawisk tribologicznych występujących przy współpracy elastomerowego pierścienia uszczelniającego z warstwą wierzchnią wału. Zastos-

* Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Instytut Mechanizacji Górnictwa, ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska, e-mail: l.grabka@interia.eu, e-mail: Stanislaw.Szweda@polsl.pl.

wano metodę analizy wymiarowej, wyróżniając cztery kryteria podobieństwa modelowego, od których zależy moment oporów ruchu występujący w rozpatrywanym węźle tribologicznym. Zaproponowano sposób wykorzystania wyników standardowo przeprowadzanych badań techniczno-wdrożeniowych pierścieni uszczelniających do wyznaczania wykładników potęgowych występujących w uzyskanym równaniu kryterialnym. Przedstawiono wstępne rezultaty identyfikacji parametrów charakteryzujących zależność momentu tarcia od cech konstrukcyjno-materiałowych pary tribologicznej.

WPROWADZENIE

Z obserwacji eksploatacyjnych współpracy pierścieni uszczelniających z wałami, zwłaszcza przemysłowych przekładni zębatych wynika, że trwałość tego węzła konstrukcyjnego w znacznym stopniu zależy od cech rozpatrywanej pary tribologicznej. Problem ten jest mało rozpoznany w przypadku, gdy warstwa wierzchnia wału ukształtowana jest poprzez regenerację z wykorzystaniem materiałów kompozytowych.

Ogólna analiza tego zagadnienia wskazuje, że w jego opisie istotnym parametrem jest moment oporów ruchu pomiędzy pierścieniem uszczelniającym a wałem. Na jego wartość i przebieg wpływają takie czynniki jak: właściwości sprężyste pierścieni uszczelniających i warstwy wierzchniej wału, współczynnik tarcia, nacisk jednostkowy w strefie styku i ciśnienie czynnika roboczego w uszczelnianym węźle oraz właściwości cieplne współpracujących elementów. Określenie wpływu wymienionych czynników na moment tarcia i cechy funkcjonalne rozpatrywanej pary tribologicznej jest zagadnieniem złożonym poznawczo i wymaga przeprowadzenia obszerniejszych badań, których zakres znacznie wykracza poza program standardowych testów odbiorczych wykonywanych przez producenta uszczelnień. Złożoność tego zagadnienia wynika przede wszystkim z dużej liczby wielkości wpływowych determinujących zakres programu badań identyfikacyjnych. Jedną z metod pomocnych w realizacji tego programu jest zastosowanie analizy wymiarowej [L. 1, 5]. Jej istota polega na sprowadzeniu opisu zjawiska do postaci funkcji bezwymiarowych kryteriów, których liczba jest mniejsza od liczby wielkości fizycznych opisujących badane zjawiska.

WYKORZYSTANIE ANALIZY WYMIAROWEJ DO OPISU KONTAKTU WARGOWEGO PIERŚCIENIA USZCZELNIAJĄCEGO Z WAŁEM

Na podstawie rozeznania problemu kontaktu wargowego pierścienia uszczelniającego z wałem (**Rys. 1**) można przyjąć, że zjawisko to opisuje ogólna funkcja zapisana w postaci:

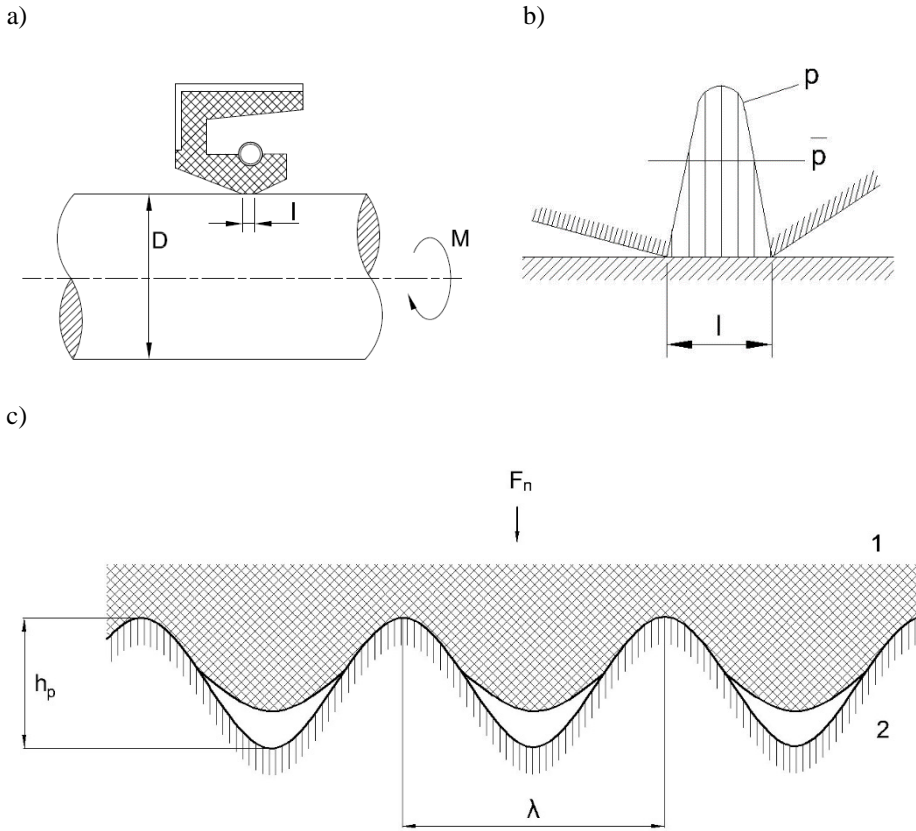
$$f(M, \mu, F, D, l, h_p, \lambda, v, E, \nu, \eta, T) = 0 \quad (1)$$

Argumenty tej funkcji wyrażone w układzie jednostek SI oznaczają:

- M – moment oporów ruchu pomiędzy wałem a pierścieniem uszczelniającym;
- μ – współczynnik tarcia kinetycznego pomiędzy wałem a pierścieniem uszczelniającym;
- F – obciążenie promieniowe wywołane naciskiem pierścienia uszczelniającego;
- D – nominalna średnica wału;
- l – szerokość odkształcenia sprężystego wargi pierścienia w styku z wałem;
- h_p – maksymalna wysokość mikronierówności powierzchni wału;
- λ – odległość technologicznych rys chropowatości wału mierzona po obwodzie wału;
- v – prędkość obwodowa wału;
- E, ν – zastępcze parametry sprężyste pary tribologicznej;
- η – współczynnik lepkości dynamicznej medium smarującego;
- t – temperatura medium smarującego.

Po wstępnej analizie zjawiska kontaktu pierścienia z wałem opisanego funkcją (1) przyjęto następujące założenia upraszczające:

- założono określoną wartość współczynnika tarcia μ pomiędzy wargą pierścienia uszczelniającego a wałem; współczynnik ten jako wielkość bezwymiarowa stanowi wprost jedno z kryteriów i może być traktowany jako wielkość stała;
- parametry mikronierówności (wysokości h_p i odległości λ mikronierówności – **Rys. 1c**) można przyjąć jako stałe dla danego rodzaju obróbki wału (najczęściej gładkościowej) i nie uwzględniać ich w dalszej analizie;
- dysponując wynikami standardowych testów odbiorczych, prowadzonych przy stałych temperaturach: medium roboczego i otoczenia ($T = \text{idem}$), przyjęto, że pomiędzy wyodrębnionym obszarem styku pierścienia z wałem a otoczeniem nie występuje wymiana ciepła (przemiana adiabatyczna) i parametry termiczne węzła tribologicznego wyłączono z dalszych rozważań;
- przyjęto, że właściwości sprężyste pary tribologicznej: pierścień uszczelniający – warstwa wierzchnia wału są określone przez: zastępczy moduł sprężystości E i zastępczą liczbą Poissona ν .



Rys. 1. Schemat ilustrujący współpracę pierścienia uszczelniającego z wałem: a – podstawowe parametry kontaktu, b – rozkład nacisku w strefie styku, c – strefa interakcji mikronierówności powierzchni pierścienia uszczelniającego 1 i wału 2, F – obciążenie promieniowe strefy styku; h_p , λ – cechy geometryczne chropowatości powierzchni wału; p – nacisk jednostkowy w strefie styku pierścienia uszczelniającego z wałem; \bar{p} – nacisk średni;

Fig.1. Diagram illustrating the cooperation of the shaft sealing ring: a – basic geometric features/attribute of contact, b – pressure distribution in the contact zone, c – interaction zone of the rotary seal surface asperities 1 and shaft 2, F – radial load contact zone; h_p , λ – geometric attribute of the surface roughness of the shaft; p – maximum pressure; \bar{p} – medium pressure

Po uwzględnieniu wymienionych założeń funkcję (1) można zapisać w nowej, uproszczonej postaci:

$$f_1(\mu, M, D, l, v, F, E, \eta) = 0 \quad (2)$$

Korzystając z podstawowych twierdzeń analizy wymiarowej [L. 1] po przyjęciu M , v oraz D jako wielkości podstawowych, zależność (2) można przekształcić do postaci funkcji – φ , określonej wzorem (3). Argumentami tej funkcji są kryteria K_1, \dots, K_4 , jak niżej:

$$\varphi(\mu, K_1, K_2, K_3, K_4) = 0 \quad (3)$$

Zgodnie z zasadami analizy wymiarowej kryteria te określają następujące zależności iloczynowe:

$$K_1 = l M_T^{a_1} v^{b_1} D^{c_1} \quad (4)$$

$$K_2 = F M_T^{a_2} v^{b_2} D^{c_2} \quad (5)$$

$$K_3 = E M_T^{a_3} v^{b_3} D^{c_3} \quad (6)$$

$$K_4 = \eta M_T^{a_4} v^{b_4} D^{c_4} \quad (7)$$

gdzie: $a_1, \dots, a_4, b_1, \dots, b_4, c_1, \dots, c_4$ – wykładniki potęgowe wyznaczone z równań wymiarowych. Po ich rozwiązaniu i wyznaczeniu wykładników potęgowych kryteria K_1, \dots, K_4 przyjmują postać:

$$K_1 = \frac{l}{D} \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{FD}{M} \quad (9)$$

$$K_3 = \frac{ED^3}{M} \quad (10)$$

$$K_4 = \frac{\eta v D^2}{M} \quad (11)$$

Ponieważ zgodnie z wzorami (9), (10), (11) każda z liczb kryterialnych K_2 , K_3 i K_4 jest uzależniona od momentu oporów ruchu – M , to zgodnie z zasadami analizy wymiarowej korzystniej jest funkcję $\varphi(K_1, \dots, K_4)$ przekształcić do

postaci wynikającej z liniowej kombinacji kryteriów K_2 , K_3 i K_4 , uzyskując równanie:

$$\varphi\left(K_1, \mu \cdot K_2, \frac{K_3}{K_2}, \frac{K_4}{K_2}\right) = 0 \quad (12)$$

Po uwzględnieniu wyrażen (8), ..., (11) funkcja kryterialna przyjmuje postać:

$$\varphi\left(K_1, \mu \cdot K_2, K'_3, K'_4\right) = \varphi\left(\frac{l}{D}, \frac{\mu FD}{M}, \frac{ED^2}{F}, \frac{\eta v D}{F}\right) = 0 \quad (13)$$

Liczbowo kryterialnym występującym w zależnościach (8) ... (13) można przypisać następującą interpretację fizyczną:

- kryterium K_1 określa względną szerokość styku pierścienia z wałem. Wynika stąd, że moment oporów tarcia M nie zależy od bezwzględnych wymiarów powierzchni styku, a od względnej wartości $\frac{l}{D}$;
- kryterium K_2 charakteryzuje względny moment oporów ruchu, gdyż jego wartość zależy od siły docisku pierścienia uszczelniającego (pasowania na wale) i ciśnienia medium smarującego;
- kryterium K_3' wyraża względną siłę sprężystego docisku pierścienia do wału proporcjonalną do ED^2 ; wyrażenie występujące w liczniku jest miarą sztywności styku pary tribologicznej. Od niej zależą opory tarcia wynikające z histerezy sprężystej pierścienia uszczelniającego i warstwy wierzchniej;
- kryterium K_4' określa warunki tworzenia się elastohydrodynamicznej warstwy medium smarującego w strefie styku wargi pierścienia uszczelniającego z powierzchnią wału.

Równanie (12) można zapisać w prostszej postaci, a mianowicie:

$$\mu \cdot K_2 = \frac{\mu FD}{M} = \varphi_1(K_1, K'_3, K'_4) \quad (14)$$

Po przekształceniach otrzymujemy zależność na moment oporu M w postaci:

$$M = \frac{\mu \cdot FD}{\varphi_1(K_1, K'_3, K'_4)} \quad (15)$$

Zależność funkcyjną (15) zapisaną w postaci jawnej określa formuła:

$$M = \frac{\mu \cdot FD}{(K_1)^x \cdot (K'_3)^y \cdot (K'_4)^z} \quad (16)$$

lub

$$M = \mu \cdot FD \cdot \left(\frac{D}{l}\right)^x \cdot \left(\frac{F}{ED^2}\right)^y \cdot \left(\frac{F}{\eta v D}\right)^z \quad (17)$$

przy czym wykładniki potęgowe x , y , z należy wyznaczyć, wykorzystując wyniki z badań eksperymentalnych.

OKREŚLENIE WARTOŚCI WYKŁADNIKÓW POTĘGOWYCH CHARAKTERYZUJĄCYCH ZALEŻNOŚCI MOMENTU OPORÓW RUCHU OD LICZB KRYTERIALNYCH

Celem wyznaczenia wykładników x , y , z występujących we wzorze (18) należy na wstępie określić wartości wszystkich wielkości fizycznych definiujących liczby kryterialne $K1$; $K3'$; $K4'$. Korzystając z wyników testów eksploatacyjnych [L. 2, 3], otrzymano następujące wielkości fizyczne charakteryzujące współpracę określonej postaci materiałowo-konstrukcyjnej pierścienia uszczelniającego z wałem o znanej średnicy D , a mianowicie:

M – moment oporów tarcia pierścienia uszczelniającego z wałem;

v – prędkość obwodowa wału;

l – szerokość odkształcenia sprężystego wargi pierścienia w styku z wałem.

W trakcie testów techniczno-wdrożeniowych pierścieni uszczelniających moment oporów ruchu oraz prędkość obwodowa wyznaczane są w odstępach minutowych, co sprawia, że materiał badawczy dotyczący tych wielkości fizycznych jest obszerny. Szerokość styku odczytywano rzadziej – w przerwach pomiędzy seriami badań. Wartość siły F obciążenia promieniowego wywołanego naciskiem pierścienia uszczelniającego na wał wyznaczono, korzystając z analizy zbudowanego modelu MES węzła uszczelniającego przedstawionego szczegółowo w opracowaniu [L. 4].

W ujęciu ogólnym, traktując jako dane moduły Younga i liczby Poissona warstwy wierzchniej wału oraz pierścienia uszczelniającego wyznaczono następujące zastępcze parametry sprężyste pary tribologicznej, korzystając z zależności:

$$E = \nu \left[\frac{E_1 E_2}{E_2 \nu_1 \vartheta + E_1 \nu_2 (1 - \vartheta)} \right] \quad (18)$$

$$\nu = \nu_1 \vartheta + \nu_2 (1 - \vartheta) \quad (19)$$

gdzie: E_1 – moduł Younga warstwy wierzchniej wału, E_2 – moduł Younga pierścienia uszczelniającego, ν_1 – liczba Poissona warstwy wierzchniej wału, ν_2 – liczba Poissona pierścienia uszczelniającego, ϑ – stosunek grubości rozpatrywanych warstw materiału.

W przypadku, gdy warstwa wierzchnia wału jest strukturą kompozytową, to zgodnie ze wzorami (18) i (19) jej cechy sprężyste będą wpływały na wyznaczone zastępcze parametry sprężyste pary tribologicznej w sposób odmienny niż dla stalowej warstwy wierzchniej wału.

Dla dalszej analizy korzystniej jest przyjąć zależność (18) przekształconą do postaci liniowego równania algebraicznego, którego niewiadomymi są wykładniki potęgowe x , y , z . Uzyskujemy wówczas zapis funkcyjny w postaci:

$$\ln \frac{M}{\mu FD} = x \ln \left(\frac{D}{l} \right) + y \ln \left(\frac{F}{ED^2} \right) + z \ln \left(\frac{F}{\eta v D} \right) \quad (20)$$

W **Tabeli 1** przykładowo zestawiono wartości wielkości fizycznych niezbędnych do wyznaczania wykładników x , y , z .

Tabela 1. Przykładowe zestawienie danych wejściowych do obliczeń x , y , z

Table 1. Sample input data for the calculation of x , y , z

i	M, Nm	$10^{-6} \cdot E$, Pa	μ	$10^4 \cdot l$, m	v , $m \cdot s^{-3}$	F, N
1	6,82	12,39	0,42	4,0	5,0	27,3
2	2,61	10,46	0,35	6,0	1,0	28,1
3	3,93	10,49	0,36	2,0	1,0	28,0

Zamieszczone w **Tabeli 1** wartości uzyskano z badań eksperymentalnych par tribologicznych różniących się charakterystyką materiałowo-konstrukcyjną. Wartości niewiadomych wykładników potęgowych x , y , z wyznaczono, rozwiązując układ liniowych równań algebraicznych zapisany w postaci macierzowej:

$$[A_i \quad B_i \quad C_i] \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [H_i]; i = 1, \dots, 3 \quad (21)$$

gdzie:

$$A_i = \ln \left(\frac{D}{l_i} \right)$$

$$B_i = \ln \left(\frac{F_i}{E_i D^2} \right)$$

$$C_i = \ln\left(\frac{F_i}{\eta v_i D}\right)$$

$$H_i = \ln\left(\frac{M_i}{\mu_i F_i D}\right)$$

W rozpatrywanym przypadku poszukiwane wykładniki potęgowe wynoszą odpowiednio:

$$x = 0,3716; y = -0,1196; z = -0,3946.$$

Zależność (18) przyjmuje zatem po uwzględnieniu wyznaczonych wykładników potęgowych następującą końcową postać:

$$M = \frac{\mu \cdot F^{0,4858} \cdot D^{2,005} \cdot E^{0,1196} \cdot \eta^{0,3946}}{l^{0,3716} \cdot v^2}.$$

Sposób wyznaczania wykładników potęgowych występujących w zależności (18) przedstawiony dla przykładowo wybranych wyników testów techniczno – wdrożeniowych uszczelnień umożliwia potraktowanie wykładników x , y , z , jako zmiennych losowych i określenie parametrów statystycznych charakteryzujących ich rozkład. Zagadnienie to jest przedmiotem obecnie prowadzonych badań.

PODSUMOWANIE

Zastosowanie metody analizy wymiarowej do opisu współpracy elastomerowego pierścienia uszczelniającego z warstwą wierzchnią wału umożliwiło wyróżnienie w równaniach modelu matematycznego czterech bezwymiarowych liczb kryterialnych. Tym samym zakres badań laboratoryjnych niezbędnych do identyfikacji czynników wpływających na wartość momentu oporów ruchu zmniejszył się do tego stopnia, że powstała możliwość wykorzystania wyników standardowo wykonywanych badań techniczno-wdrożeniowych do identyfikacji postaci zależności charakteryzującej wpływ cech konstrukcyjno-materiałowych na moment oporów ruchu.

W niniejszej publikacji przedstawiono wstępne rezultaty identyfikacji parametrów charakteryzujących tę zależność uzyskane na podstawie wyników testów techniczno-wdrożeniowych przeprowadzonych we współpracy z jednym z wiodących producentów pierścieni uszczelniających.

Dalsze wyniki testów są obecnie opracowywane. Na ich podstawie zostaną wyznaczone parametry statystyczne charakteryzujące rozkład wykładników potęgowych x , y , z występujących w zależności (18), traktowanych jako zmienne losowe.

LITERATURA

1. Müller L.: Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983.
2. Gawliński M.: Lokalne warunki styku a opory tarcia elastomerowych wargowych pierścieni uszczelniających, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
3. Flitney R.: *Seals and sealing handbook*. Elsevier, 2007
4. Grabka L., Markowicz J., Szweda S.: Modelowanie nacisku na powierzchni styku wargowego pierścienia uszczelniającego z wałem, *Maszyny Górnicze* nr 4, 2013, s. 20–26.
5. Szczerek M., Wiśniewski M. (red.): *Tribologia i Tribotechnika*. Polskie Towarzystwo Tribologiczne – ITeE – SIMP, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.

Summary

This article presents a proposal for a description of tribological phenomena occurring during the cooperation of a rotary seal on the surface of a shaft, which has not been well recognized. The method of dimensional analysis was used, highlighting the four criteria of model similarity. The moment of resistance movement occurring in the considered tribological node is dependent on these criteria. By using the results of tests of technical standard implementation of rotary seal, a method of determining the exponents occurring as the result of the criteria equation are presented. The preliminary results of the identification of parameters characterizing the dependence between the friction torque and characteristics of material construction tribological pairs are also presented.