

**Leszek GRABKA<sup>\*</sup>, Jacek SPAŁEK<sup>\*</sup>, Stanisław SZWEDA<sup>\*</sup>**

## **IDENTYFIKACJA SIŁY DOCISKU I PARAMETRÓW SPRĘŻYSTYCH W KONTAKCIE TARCIOWYM WAŁU Z WARGOWYM PIERŚCIENIEM USZCZELNIAJĄCYM**

### **IDENTIFICATION OF CONTACT FORCE AND OF ELASTIC PARAMETERS IN THE ZONE OF FRICTIONAL CONTACT OF THE SHAFT WITH A LIP SEALING RING**

#### **Słowa kluczowe:**

tarcie, uszczelnienie stykowe wału, parametry sprężyste kontaktu, modelowanie MES

#### **Key words:**

friction, rotary seal, elastic parameters, model FEM

#### **Streszczenie**

W opracowaniu przedstawiono istotny etap analityczno-modelowego podejścia do określenia podstawowych parametrów definiujących moment tarcia generowany

---

<sup>\*</sup> Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geodezji, Instytut Mechanizacji Górnictwa, ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice, Polska, e-mail: l.grabka @interia.eu, tel. 327241049; e-mail:Jacek.Spalek@polsl.pl, tel. 322315946; e-mail: Stanislaw.Szweda@polsl.pl, tel.: 322323815.

w strefie styku elastomerowego pierścienia uszczelniającego z wałem o złożonej strukturze warstwy wierzchniej. Obejmuje on: wyznaczenie siły promieniowego oddziaływania pierścienia uszczelniającego na wał z wykorzystaniem modelu węzła uszczelniającego i metody elementów skończonych oraz wyznaczenie zastępczych parametrów sprężystych styku wargowego pierścienia uszczelniającego ze złożoną strukturalnie warstwą wierzchnią wału. Wyznaczone parametry w połączeniu ze zbiorem wyników testów odbiorczych uszczelnień umożliwią predykcję czynników wpływających na opory tarcia w tym uszczelnieniu.

## WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych czynników decydujących o trwałości i funkcjonalności węzła uszczelniającego jest moment tarcia, generowany w parze tribologicznej: wargowy pierścień uszczelniający-wał. Korzystając z wyników obserwacji eksploatacyjnych oraz danych literaturowych [L. 1–3] dotyczących kontaktu wargowego pierścienia uszczelniającego z wałem stwierdzono, że można problem ten ująć ogólną funkcją o postaci [L. 4]:

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

gdzie:

- M – moment oporu ruchu (moment tarcia) wału w kontakcie z pierścieniem uszczelniającym;
- $\mu$  – współczynnik tarcia pomiędzy wałem a wargowym pierścieniem uszczelniającym;
- F – siła promieniowa spowodowana naciskiem pierścienia uszczelniającego;
- D – nominalna średnica wału;
- l – szerokość odkształcenia sprężystego wargi pierścienia w styku z wałem;
- $h_p$  – maksymalna wysokość mikronierówności (chropowatości), powierzchni wału;
- $\lambda$  – odległość technologicznych rys obwodowych powierzchni wału;
- v – prędkość obwodowa wału;
- E – zastępczy moduł sprężystości;
- $\nu$  – liczba Poissona;
- $\eta$  – współczynnik lepkości dynamicznej medium smarującego;
- T – temperatura medium smarującego.

Jak wynika z postaci funkcji (1), poszukiwana wartość momentu oporu ruchu zależy od dużej liczby wielkości fizycznych. Stosując metodę analizy wy-

miarowej [L. 5] i przyjmując założenia upraszczające, jak w [L. 4], można równanie (1) przekształcić do postaci zależnej od czterech bezwymiarowych liczb kryterialnych:

$$\varphi(K_1, K_2, K_3, K_4) = 0 \quad (2)$$

przy czym:

$$K_1 = \frac{l}{D} \quad K_2 = \frac{\mu FD}{M} \quad K_3 = \frac{ED^2}{F} \quad K_4 = \frac{\eta v D}{F}$$

Znaczenie fizyczne liczb kryterialnych  $K_1, \dots, K_4$ , oraz ich zastosowanie do interpretacji uzyskanych wyników badań doświadczalnych omówiono szerzej w [L. 4].

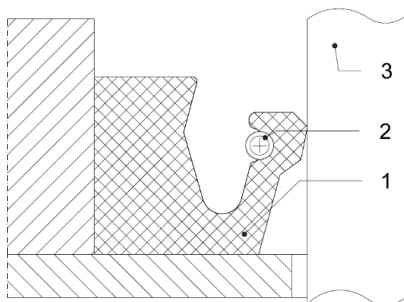
Należy podkreślić, że niektóre spośród wielkości fizycznych tworzących kryteria  $K_1, \dots, K_4$  są rejestrowane podczas standardowych testów odbiorczych pierścieni uszczelniających [L. 3, 5, 6]. W związku z tym stwierdzono, że wyniki tych testów można wykorzystać do identyfikacji momentu tarcia wału, jeżeli wspomagająco metodami modelowo-analitycznymi zostaną wyznaczone następujące parametry:

- siła  $F$  obciążenia promieniowego wargi pierścienia uszczelniającego,
- sprężyste parametry zastępcze  $E$  i  $\nu$  pary tribologicznej: warstwa wierzchnia wału – pierścień uszczelniający.

W opracowaniu poszukiwaną wartość siły  $F$  wyznaczono, korzystając z modelu fizycznego węzła uszczelniającego i zastosowania MES. Model rozpatrywano, przyjmując obciążenie statyczne z uwzględnieniem procesu montażu uszczelnienia na wale. Przyjęto też założenie, że siła nacisku wyznaczona z wykorzystaniem tego modelu będzie reprezentatywna w analizie wpływu cech węzła uszczelniającego na moment oporu ruchu. Zastępcze parametry styku –  $E$  i  $\nu$  wyznaczono, stosując uogólnione prawo Hooke'a.

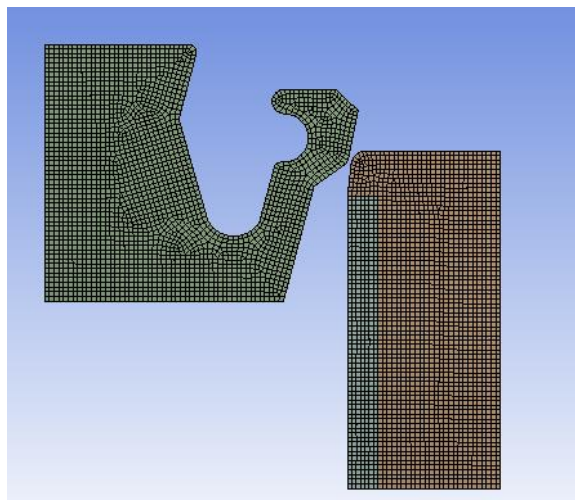
## WYZNACZANIE SIŁY $F$ NACISKU WARGI PIERŚCIENIA USZCZELNIAJĄCEGO NA WAŁ Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Korzystając z metody elementów skończonych, zbudowano model MES węzła uszczelniającego (Rys. 2), przyjmując jako dane: standardowy pierścień uszczelniający o wymiarach  $160 \times 200 \times 16$  mm współpracujący z wałem o średnicy  $D = 160$  mm. Przedmiotem modelowania jest jeden z węzłów uszczelniających przewidzianych do dalszych badań doświadczalnych.



**Rys. 1. Przekrój węzła uszczelniającego: 1 – wargowy pierścień uszczelniający, 2 – sprężyna, 3 – wał**

Fig. 1. Cross section of rotary seal 1 – rotary lip seal, 2 – spring, 3 – shaft



**Rys. 2. Dyskretyzacja modelu MES pierścienia uszczelniającego i wału**

Fig. 2. Meshing of the rotary seal and shaft FEM model

Budując model węzła uszczelniającego, wykorzystano jego osiową symetrię. Na **Rys. 2** elementy skończone warstwy wierzchniej wału wyróżniono jaśniejszym kolorem i nadano im cechy materiałowe kompozytu. Z uwagi na nieliniowe właściwości sprężyste elastomeru elementom skończonym pierścienia przypisano biliniową charakterystykę materiałową [L. 8]. Przyjęte w omawianym przykładzie warunki brzegowe, rodzaj i wartości zadane obciążenia zewnętrznego pierścienia uszczelniającego oraz wielkość przemieszczenia montażowego przedstawiono schematycznie na **Rys. 3**.

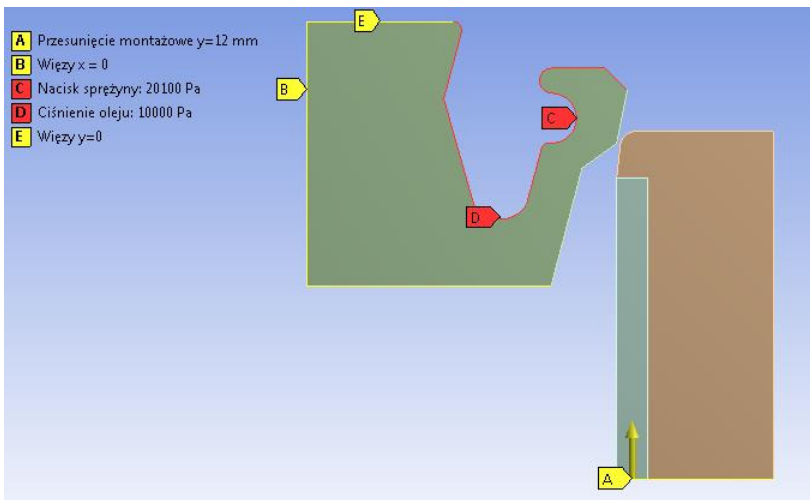
Węzłom położonym na powierzchni B odebrano przemieszczenia w kierunku promieniowym (oś  $x$ ). Przemieszczenia w kierunku równoległym do osi

wału (oś  $y$ ) odebrano węzłom leżącym na powierzchni E. Powierzchnię D obciążono ciśnieniem oleju. Ponadto w punkcie C tej powierzchni przyłożono nacisk jednostkowy sprężyny wyznaczony z zależności:

$$p_{sp} = \frac{2 s_r (\pi D_{sp} - l_0)}{D_{sp} d l_0} ; \text{MPa} \quad (3)$$

gdzie:

- $s_r$  – sztywność jednostkowa sprężyny, N/mm/mm,
- $D_{sp}$  – średnica pierścienia uszczelniającego zamontowanego na wale, wyznaczona w osi sprężyny, mm,
- $l_0$  – nominalna długość nieodkształconej sprężyny, mm,
- $d$  – średnica nominalna sprężyny, mm.



**Rys. 3. Warunki brzegowe oraz schemat przyjętego obciążenia modelu**

Fig. 3. Boundary conditions and outline of load model

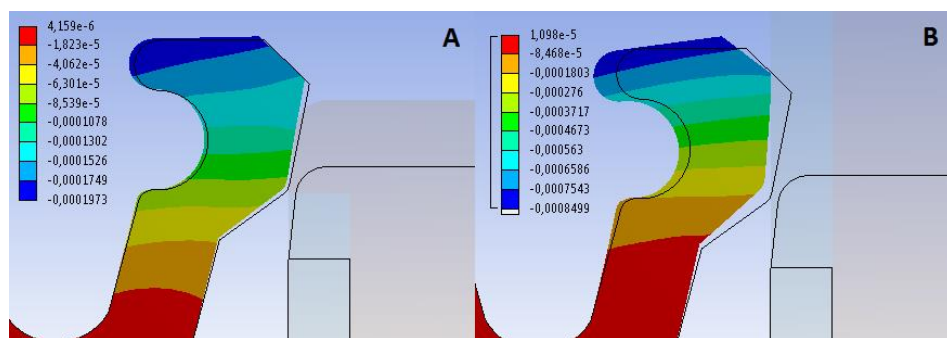
Wartość nacisku jednostkowego  $p_{sp}$  zastosowaną w analizowanym modelu węzła uszczelniającego wyznaczono, przyjmując dane charakteryzujące węzeł uszczelniający przewidziany do dalszych badań eksperymentalnych:  $s_r = 52 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,  $D_{sp} = 169,68 \text{ mm}$ ,  $l_0 = 482,4 \text{ mm}$ ,  $d = 3,2 \text{ mm}$ .

Jakkolwiek głównym celem modelowania było wyznaczenie wartości statycznej siły nacisku pierścienia na wał, to podkreślić należy, że model przedstawiony na **Rys. 2** umożliwi również symulację kolejnych etapów procesu montażu węzła uszczelniającego. Montaż węzła uszczelniającego symulowano, zadając przemieszczenie powierzchni A (**Rys. 3**) i zwiększając zarówno ciśnienie

nie oleju, jak również nacisk sprężyny od wartości równej zero do wartości maksymalnej (wynoszącej odpowiednio  $p_0$  i  $p_{sp}$ ).

Na **Rys. 4** przedstawiono przykładowe mapy przemieszczenia pierścienia podczas montażu węzła uszczelniającego. Cienką czarną linią zaznaczono początkowe położenie wału oraz zarys nieodkształconego pierścienia uszczelniającego.

Zaznaczyć należy, że głównym celem analizy było wyznaczenie siły nacisku pierścienia uszczelniającego na wał po zakończeniu procesu montażu i obciążeniu pierścienia uszczelniającego wynikającym zarówno ze sprężystego oddziaływania pierścienia, jak również zadanego ciśnienia medium.

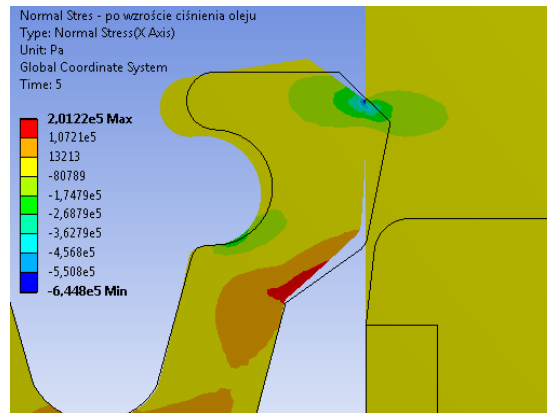


**Rys. 4. Mapy przemieszczenia pierścienia uszczelniającego podczas symulacji jego montażu: A – w chwili początkowego zetknięcia się pierścienia z wałem, B – po zakończeniu procesu montażu pierścienia oraz obciążeniu ciśnieniem  $p_{sp}$  i  $p_0$**

Fig. 4. Maps of rotary seal displacement during the simulation of its assembly: A – in the initial contact of ring with shaft, B – upon assembly process of the ring and load pressure of  $p_{sp}$ ,  $p_0$

Przykładową mapę naprężenia promieniowego w strefie styku wargi pierścienia z wałem w zmontowanym węźle uszczelniającym przedstawiono na **Rys. 5**. Stwierdzono, że dla przyjętych parametrów analizy największe naprężenie promieniowe wynosi 0,645 MPa i występuje w miejscu styku wargi pierścienia z wałem.

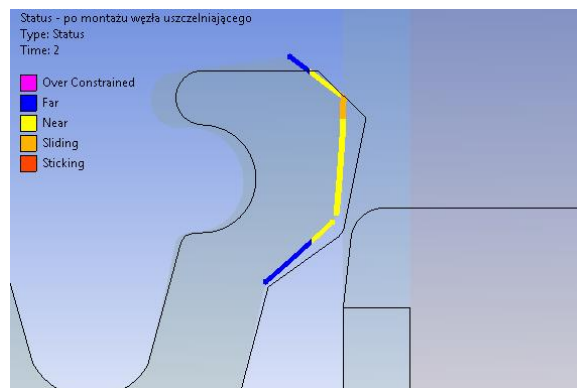
Interakcję pierścienia uszczelniającego z warstwą wierzchnią wału modelowano w programie ANSYS za pomocą tarcowych elementów kontaktowych. Siła styczna przenoszona przez te elementy jest ograniczona do wartości siły tarcia rozwiniętego, charakteryzowanego współczynnikiem tarcia  $\mu$ . W przypadku, gdy składowa obciążenia zewnętrznego styczna do płaszczyzny poślizgu była większa od siły tarcia rozwiniętego, następował poślizg współpracujących elementów.



**Rys. 5. Mapa naprężenia promieniowego  $\sigma_x$  w zmontowanym węźle uszczelniającym**

Fig. 5. Map of radial stress  $\sigma_x$  in assembled rotary seal

Na **Rys. 6** przedstawiono stan elementów w strefie kontaktu (w programie ANSYS oznaczany angielskim terminem „status”) po montażu pierścienia uszczelniającego na wale. Z wykresu stanu elementów kontaktowych [L. 10] wynika, że styk wargi pierścienia z wałem występuje tylko na krótkim odcinku strefy kontaktu typu „Sliding” [L. 12].

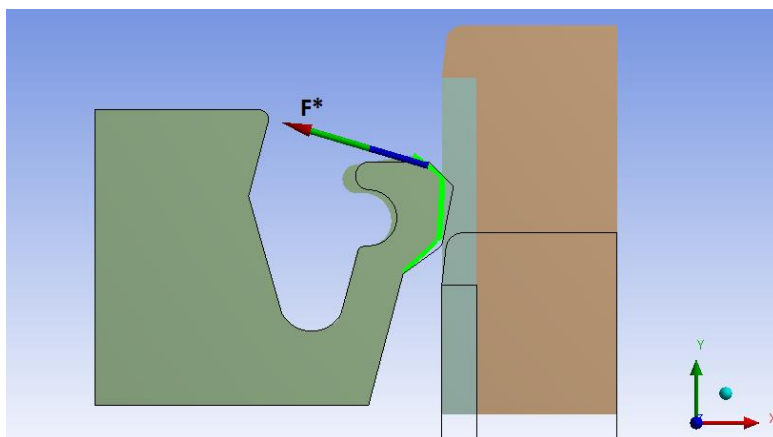


**Rys. 6. Stan kontaktu po osadzeniu pierścienia uszczelniającego na wale**

Fig. 6. Contact state after sealing assembly rotary seal on shaft

Jak wykazano, przedstawiony model węzła uszczelniającego umożliwił wyznaczenie wartości jednostkowego nacisku wargi pierścienia uszczelniającego na warstwę wierzchnią wału z uwzględnieniem cech sprężystych i geometrycznych pierścienia jego pasowania na wale oraz ciśnienia medium roboczego. Stwierdzono, że istotny wpływ na stan naprężenia oraz rozkład nacisku jednostkowego wargi na wał mają: stan naprężenia spowodowany osadzeniem

pierścienia na wale oraz ciśnienie oleju w uszczelnianej przestrzeni. W wyniku obliczeń przeprowadzonych z wykorzystaniem modelu MES wyznaczono, zestawione w **Tab. 1**, wartości składowych siły  $F^*$  (**Rys. 7**) oddziaływania pierścienia na wał –  $F_x^*$  i  $F_y^*$ .



**Rys. 7. Graficzny obraz siły oddziaływania pierścienia na wał uzyskany z postprocesora programu ANSYS**

Fig. 7. Graphical image of rotary seal impact on shaft, obtained from a postprocessor of the ANSYS program

**Tabela 1. Zestawienie przykładowych wyników obliczeń składowych siły nacisku –  $F_x^*$ ,  $F_y^*$  pierścienia uszczelniającego na wał**

Table 1. Examples of calculation results for the components –  $F_x^*$ ,  $F_y^*$  of the rotary seal load on shaft

Lp.	Materiał uszczelki	Materiał warstwy wierzchniej wału	$F_x^*$ , N	$F_y^*$ , N
1	NBR	Stal stopowa	28,028	12,462
2	NBR	Kompozyt A	30,476	9,012
3	NBR	Kompozyt B	30,477	9,012
4	FKM	Stal stopowa	31,460	13,330
5	FKM	Kompozyt A	29,259	8,634
6	FKM	Kompozyt B	29,259	8,634

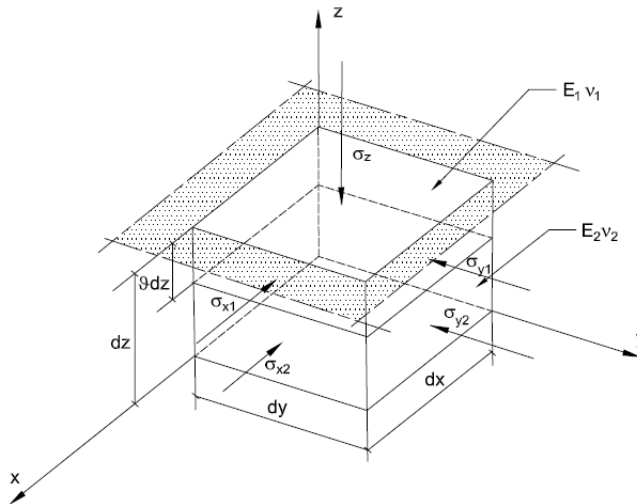
Uwaga: symbole w tabeli oznaczają: NBR – kauczuk butadienowo-akrylonitrylowy, FKM – kauczuk fluorowy, Kompozyt A – chemoutwardzalny kompozyt dwuskładnikowy, Kompozyt B – kompozyt polimerowo-stopowy.

Reasumując: siła  $F$  nacisku promieniowego pierścienia uszczelniającego na wał występująca w zależności (1) jest równa wyznaczonej składowej  $F_x^*$  (**Tab. 1**). Jak już wspomniano, siła ta jest jednym z podstawowych parametrów umożliwiających identyfikację zależności momentu oporu ruchu wału (momentu tarcia) od cech węzła uszczelniającego i warunków jego użytkowania.



## ZASTĘPCZE PARAMETRY SPRĘŻYSTE PARY TRIBOLOGICZNEJ PIERŚCIEN USZCZELNIAJĄCY-WAŁ

Celem wyznaczenia zastępczych parametrów sprężystych  $E_e$  oraz  $\nu_e$  rozpatrzono stan odkształcenia i stan naprężenia nieskończenie małego elementu zbudowanego z dwóch materiałów charakteryzowanych odpowiednio przez  $E_1$  i  $\nu_1$  oraz  $E_2$  i  $\nu_2$  (Rys. 8). W przypadku nieliniowej charakterystyki materiałowej moduł sprężystości podłużnej traktowany jest jako moduł styczny, wyznaczony dla stanu naprężenia w rozpatrywanym elemencie.



**Rys. 8.** Stan naprężenia i odkształcenia dwuwarstwowego elementu sprężystego  
 Fig. 8. Stresses state and deformation of dual-layer spring element

Zaniedbując wydłużenie jednostkowe w kierunku osi  $x$ , równoległej do osi wału oraz względem osi  $y$ , stycznej do powierzchni wału, przyjęto, że w rozpatrywanym elemencie panuje jednokierunkowy stan odkształcenia.

Korzystając z równań prawa Hooke'a, otrzymano po przekształceniach zależności określające zastępczy moduł sprężystości  $E_e$ :

$$E_e = \nu_e \left[ \frac{E_1 E_2}{E_2 \nu_1 \vartheta + E_1 \nu_2 (1 - \vartheta)} \right] \quad (4)$$

oraz zastępczą liczbę Poissona  $\nu_e$ :

$$\nu_e = \nu_1 \vartheta + \nu_2 (1 - \vartheta) \quad (5)$$

Zależności (4) i (5) wraz z wyznaczoną siłą nacisku  $F$  stanowią podstawę do analitycznej predykcji momentu tarcia w uszczelnieniu.

## PODSUMOWANIE

Niezbędnym etapem zaprezentowanego analityczno-modelowego podejścia do identyfikacji momentu tarcia generowanego w rozpatrywanym węźle tribologicznym jest wyznaczenie: siły promieniowej  $F$  nacisku wargowego pierścienia uszczelniającego na wał oraz sprężystych parametrów zastępczych  $E_c$  i  $\nu_c$  charakteryzujących strefę styku z uwzględnieniem złożonej (kompozytowej) struktury warstwy wierzchniej. Przedstawiono przykładowe wyniki analizy modelu MES węzła uszczelniającego, wyznaczając poszukiwaną wartość siły nacisku  $F$  dla wybranych kombinacji materiału pierścienia uszczelniającego i warstwy wierzchniej wału. Ponieważ wielkość nacisku jednostkowego w strefie styku istotnie wpływa na stan współpracujących powierzchni oraz hermetyczność węzła uszczelniającego, to wartość siły nacisku wyznaczona metodą elementów skończonych stanowi cenne uzupełnienie wyników standardowych testów jakościowo odbiorczych pierścieni uszczelniających, umożliwiając analizę czynników wpływających na opory ruchu w szerszym zakresie.

Przedstawione w opracowaniu sposoby wyznaczania: zastępczych parametrów sprężystych pary tribologicznej oraz promieniowej siły nacisku pierścienia na wał umożliwiają analityczną identyfikację związku pomiędzy momentem tarcia a wielkościami mającymi wpływ na funkcjonalność węzła uszczelniającego. Zaprezentowane metody mogą także być pomocne dla sformułowania wniosków uogólniających obszerny zbiór wyników testów jakościowo odbiorczych uszczelnień i w konsekwencji dla ustalenia wielkości granicznych momentu tarcia dla danego typu uszczelnienia wału i określenia ilościowego kryterium oceny cech użytkowych węzła uszczelniającego. Problematyka ta stanowi przedmiot dalszych badań realizowanych przez autorów.

## LITERATURA

1. Flitney R.: *Seals and sealing handbook*, Elsevier, 2007.
2. Szczerek M., Wiśniewski M. (red.): *Tribologia i Tribotechnika*. Polskie Towarzystwo Tribologiczne – ITeE – SIMP, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
3. Gawliński M.: *Lokalne warunki styku a opory tarcia elastomerowych wargowych pierścieni uszczelniających*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
4. Grabka L., Szweda S.: *Identyfikacja parametrów tribologicznych charakteryzujących współpracę elastomerowego pierścienia uszczelniającego z wałem*, *Tribologia* nr 6/2014.

5. SAE International, Seals-Testing of Radial Lip (Cancelled Oct 2002) – J110\_200210.
6. Wennehorst B., Poll G.W.G.: Investigations into the tribological characteristics of radial lip seal., Proceed. 20th Int. Conf. On Fluid Sealing, 7.–9. Oct. 2009, Nottingham UK, pp. 213–229.
7. Müller L.: Zastosowanie analizy wymiarowej w badaniach modeli, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983.
8. Grabka L., Markowicz J., Szweda S.: Modelowanie nacisku na powierzchni styku wargowego pierścienia uszczelniającego z wałem, Maszyny Górnicze nr 4/2013, s. 20–26.
9. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: Wytrzymałość materiałów, WNT Warszawa 1997.
10. Łączek S.: Modelowanie i analiza konstrukcji w systemie MES Ansys v. 11, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2011.
11. Moore D.F.: Principles and applications of tribology. Pergamon Press, 1975.
12. Instrukcje programu ANSYS Workbench.

## Summary

**An analytical and model approach for the determination of main parameters defining the moment of friction generated in the zone contact of an elastomeric sealing ring with a shaft with a complex covering layer. The approach includes the determination of the force of the radial action of the sealing ring on the shaft with use of sealing node model and finite elements method as well as the determination of substitute elastic parameters of the lip contact of the sealing ring with the structurally complex cover layer of the shaft. Determined parameters in combination with a set of test results enabled predicting the factors affecting the friction resistance in this seal.**