

**Zbigniew ZDZIENNICKI, Andrzej MACIEJCZYK**  
Politechnika Łódzka, Łódź

## **WŁASNOŚCI NIEZAWODNOŚCIOWE WARGOWYCH PIERŚCIENI USZCZELNIAJĄCYCH**

### **Słowa kluczowe**

Pierścienie wargowe uszczelniające wałki, mechanizm uszkodzenia/dysfunkcji wargowych pierścieni uszczelniających, funkcja prawdopodobieństwa uszkodzeń pierścieni, funkcja niezawodności pierścieni, kwantyle.

### **Streszczenie**

Artykuł opisuje własności niezawodnościowe wargowych pierścieni uszczelniających – jednego z najbardziej popularnych i najszerszej stosowanych uszczelnień wirujących wałków. W artykule przedstawiono mechanizm uszkodzenia tych uszczelnień, jak i konsekwencje ich uszkodzeń.

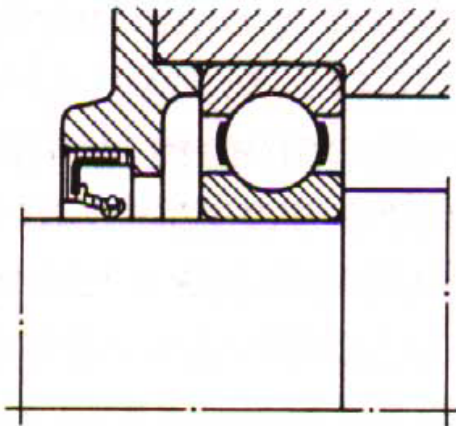
Opierając się na danych dostępnych w literaturze fachowej, zostały wyznaczone dwie podstawowe funkcyjne charakterystyki niezawodnościowe tych uszczelnień: funkcja prawdopodobieństwa uszkodzeń i funkcja niezawodności. Zmienna losowa opisująca uszkodzenia wargowych pierścieni uszczelniających ma rozkład Gaussa, stąd funkcja prawdopodobieństwa uszkodzeń dla tych pierścieni jest charakterystyczną funkcją gaussowską typu „dzwon”. Funkcję niezawodności rozważanych uszczelnień podano w postaci analitycznej, stosując do tego tzw. funkcję błędu.

W oparciu o uzyskane funkcyjne charakterystyki niezawodnościowe wyznaczono wartości liczbowe kwantyli rozważanego uszczelnienia – zarówno dla pojedynczego pierścienia, jak i dla jego układów składających się z kilku sztuk.

Uzyskane wielkości funkcyjne przedstawiono w postaci wykresów.

## Wprowadzenie

Wargowe pierścienie uszczelniające, popularnie nazywane simmeringami, lub pierścieniami Simmera są najczęściej stosowanymi uszczelnieniami wirujących wałków w konstrukcjach mechanicznych (przekładnie zębate, silniki, pompy, wentylatory itd.). Od strony zewnętrznej chronią łożyska toczne przed zanieczyszczeniami przenikającymi z otoczenia do przestrzeni zamkniętej, w której znajdują się łożyska. Zapobiegają wydostawaniu się środka smarnego na zewnątrz obudowy mechanizmu (rys. 1).



Rys. 1. Przykład uszczelnienia wału za pomocą wargowego pierścienia uszczelniającego

O ich ogromnej popularności może świadczyć fakt, że w Stanach Zjednoczonych co roku produkowanych jest 38 milionów tych uszczelnień, [1]. Na tak dużą popularność niewątpliwie decydujący wpływ ma ich bardzo niska cena. Niestety, jest to ich jedyna zaleta. Po bardzo krótkim okresie swojej pracy uszczelnienia te szybko się zużywają, tracąc bezpowrotnie swoje właściwości uszczelniające. Niezbędna jest ich częsta wymiana na nowe. Brak podjęcia odpowiednich działań zapobiegawczych (wymiana uszczelnień zużytych) zawsze prowadzi do poważnego skrócenia trwałości łożysk, które są przez te pierścienie chronione.

### 1. Mechanizm uszkodzenia wargowych pierścieni uszczelniających

Uszczelnienie za pomocą elastycznych pierścieni wargowych, w przeciwieństwie do klasycznych uszczelnień labiryntowych, zabezpiecza łożyska przed penetracją w głąb przestrzeni zamkniętej, gdzie są osadzone wszelkie zanieczyszczenia zarówno podczas pracy maszyny, jak i też podczas jej postoju. Niestety, prawidłowe działanie tego typu uszczelnień jest bardzo krótkie w porównaniu z trwałością innych elementów, np. łożysk. Przyczyną szybkiego zu-

żywania się wargowych pierścieni uszczelniających jest ich konstrukcja. Styk wargi pierścienia i wałka jest niemal liniowy, bowiem kształt zakończenia wargi pierścienia ma postać klina. W oparciu o przeprowadzone badania moc tarcia tracona przy ruchu wargowych pierścieni uszczelniających wynosi ok. 150 W (przy temperaturze wargi pierścienia  $80\text{ C}^0$  i obrotach wałka 2500 obr./min), [2]. Powstające w wyniku tarcia ciepło zmienia strukturę ostrza klina wargi, które staje się twarde, traci własności sprężyste niezbędne do precyzyjnego przylegania do powierzchni wałka i ostatecznie rysuje tę powierzchnię.

W pierwszej fazie utraty własności uszczelniających przez pierścień zachowuje się on podobnie do uszczelnienia labiryntowego, [2]. Penetracja zanieczyszczeń, w tym przede wszystkim zawilgoconego powietrza, następuje podczas postoju maszyny, w której znajduje się omawiany pierścień uszczelniający. W fazie drugiej, kiedy zużycia wargi pierścienia i rysy na powierzchni wałka są już duże, penetracja zanieczyszczeń do przestrzeni zamkniętej, w której są łożyska, jest bardziej intensywna i zachodzi zarówno podczas postoju maszyny, jak i podczas jej ruchu. W fazie tej zaczyna być widoczny wyciek środka smarnego z przestrzeni zamkniętej łożysk na zewnątrz. Uszczelnienie traci wszystkie swoje funkcje. Niezbędna jest wymiana zużytych pierścieni uszczelniających na nowe.

## 2. Konsekwencje złej pracy wargowych pierścieni uszczelniających

Zła praca wargowych pierścieni uszczelniających wpływa przede wszystkim na znaczące pogorszenie pracy łożysk, które chronione są przez te pierścienie. Wyniki badań przytoczone w pracach [1] i [2] wykazują, że zanieczyszczenie oleju smarnego wodą w ilości 0,002% (jedna kropla wody na jeden litr oleju) zmniejsza trwałość łożysk tocznych do wartości 48% ich trwałości obliczeniowej. Tak niewielka ilość wody w oleju smarującym, której to lepkość zasadniczo różni się od lepkości oleju, powoduje, że film elastohydrodynamiczny, rozwijany pomiędzy elementami tocznymi łożyska a jego bieżniami, zostaje przerwany i elementy te wchodzą ze sobą w metaliczny kontakt. To z kolei inicjuje cały łańcuch zjawisk przyspieszonego zużycia i destrukcji łożyska. Do zainicjowania przedwczesnego zużycia, a w konsekwencji uszkodzeń łożyskowań, zupełnie wystarczające są niewielkie ilości wody przedostające się wraz z zawilgoconym powietrzem z otoczenia maszyny do zamkniętej przestrzeni, w której znajdują się łożyska. W powietrzu zazwyczaj znajdują się również i inne zanieczyszczenia, które wywołują także negatywny wpływ na pracę łożysk. W praktyce konstruktor, dobierając łożyska powinien je znacznie przewymiarować w stosunku do potrzeb wynikających z ich obciążenia i wymaganej trwałości. Działanie takie byłoby naganne zarówno z punktu widzenia sztuki inżynierskiej, jak i ekonomicznego. Niezbędne zatem wydaje się zamieszczenie w dokumentacjach technicznych zalecenia odpowiednio częstych wymian pierścieni uszczelniających z uwagi na ich ograniczoną trwałość.

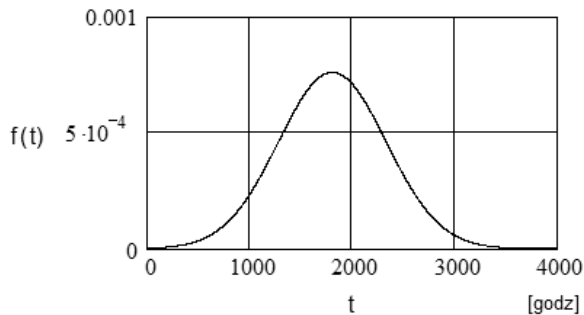
### 3. Charakterystyki niezawodnościowe wargowych pierścieni uszczelniających

Producenci pierścieni uszczelniających z wargą nie są skłonni ujawniać swoim klientom danych dotyczących uszkodzeń tych elementów. Niemniej jednak dla typowych pierścieni nitrylowych rozkład zmiennej losowej opisującej czas do ich uszkodzenia (dysfunkcji) ma charakter gaussowski z wartością średnią  $\mu = 1800$  godz. (pracy uszczelnienia) i odchyleniem standardowym  $\sigma = 525$  godz. (pierścienie wykonane w bardzo dobrej technologii z selekcyjonowaniem wyrobów; dla gorszych technologii wykonania parametr ten jest dużo wyższy, np.  $\sigma = 950$  godz.) [1, 2].

Dla powyższych parametrów rozkładu gaussowskiego zmiennej losowej opisującej czas uszkodzenia tych pierścieni funkcja prawdopodobieństwa ich uszkodzeń ma postać:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

Wykres zależności (1) przedstawiono poniżej (rys. 2).



Rys. 2. Funkcja prawdopodobieństwa uszkodzeń wargowych pierścieni uszczelniających

Funkcja niezawodności rozważanych pierścieni zostaje wyznaczona z zależności:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (2)$$

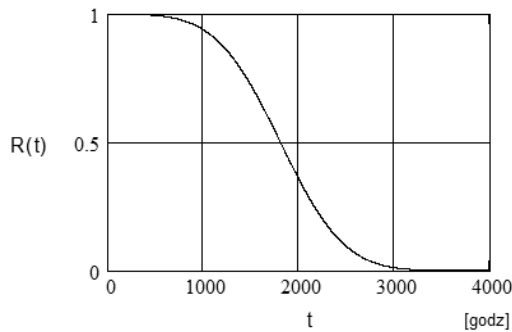
Aby rozwiązać powyższą zależność, należy funkcję gaussowską (1) scałkować w granicach od 0 do  $t$ . Funkcję pierwotną całki z wyrażenia (2) można wyrazić za pomocą funkcji błędów  $\text{erf}(t)$  w następujący sposób [3]:

$$\int \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt = \frac{1}{2} \text{erf}\left(\frac{t-\mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) + C \quad (3)$$

A zatem zależność (2) przybierze postać:

$$R(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\tau - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] d\tau = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{t - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right) \quad (4)$$

Wykres zależności (4) został przedstawiony poniżej (rys. 3).



Rys. 3. Funkcja niezawodności wargowych pierścieni uszczelniających

Opisane powyższymi charakterystykami niezawodnościowymi wargowe pierścienie uszczelniające, jako pojedynczy obiekt, mają kwantyl 10-procentowy równy:

$$t_{10} = 1126 \quad \text{godz.}$$

natomiast kwanty 1-procentowy

$$t_{01} = 575 \quad \text{godz.}$$

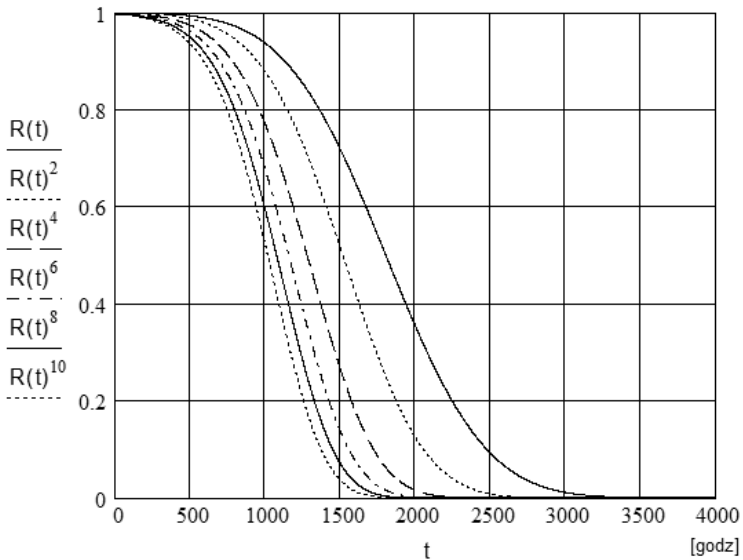
Są to wartości bardzo niskie. W porównaniu z typowymi wielkościami odpowiednich kwantyli, np. układu łożysk w przekładniach zębatych, są one wielokrotnie mniejsze. Dla układów łożysk przemysłowych przekładni zębatych małych i średnich mocy wielkości te odpowiednio wynoszą:

$$t_{10} = 20 \cdot 10^3 \quad \text{godz.} \quad \text{i} \quad t_{01} = 4600 \quad \text{godz.}$$

Jak widać z zestawienia powyższych wielkości, wargowe pierścienie uszczelniające stanowią słabe ogniwo układów mechanicznych.

Z reguły w układach mechanicznych znajduje się dwa lub więcej rozważanych pierścieni uszczelniających. Jeśli wszystkie wargowe pierścienie uszczel-

niające, znajdujące się w danym układzie, rozważyć jako jeden element niezawodnościowy danego układu, to funkcje niezawodności takiego elementu, w zależności od liczby pierścieni, będą przebiegały jak na rys. 4 (układ pierścieni uszczelniających ma strukturę szeregową – uszkodzenie jednego z pierścieni nie zapewnia założonego poziomu uszczelnienia. Traktowanie zespołu pierścieni uszczelniających jako układu równoległego, gdzie uszkodzenie jednego z nich skutkuje przejściem jego funkcji przez pozostałe jest błędne).



Rys. 4. Przebieg funkcji niezawodności dla układów wargowych pierścieni uszczelniających złożonych z różnej ilości elementów

Wartości kwantyli 10-procentowych, dla przedstawionych na rys. 3 przebiegów, zestawione są w tabeli 1.

Tabela 1. Wielkości kwantyli  $t_{10}$  układów uszczelnień pierścieniowych

| Ilość pierścieni, $n$   | 1    | 2   | 4   | 6   | 8   | 10  |
|-------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Kwantyl $t_{10}$ [godz] | 1126 | 457 | 335 | 267 | 220 | 185 |

## Wnioski

1. W układach mechanicznych wargowe pierścienie uszczelniające stanowią słabe ogniwo tych układów.

2. Powyższe wynika z niskich własności niezawodnościowych tych elementów – wartości kwantyli 10-procentowych dla układów składających się z tych pierścieni podano w tabeli 1.
3. Szybkie zużywanie się wargowych pierścieni uszczelniających i związana z tym szybka utrata ich zdolności do poprawnej pracy często nie zostaje uwzględniona przez konstruktorów podczas projektowania łożyskowań tocznych.
4. Uzyskane w pracy wartości liczbowe kwantyli 10-procentowych, dla układów złożonych z kilku pierścieni, stanowią bardzo użyteczną informację w procesie eksploatacji maszyn z tego typu uszczelnieniami (umożliwiają np. poprawne określenie terminów: inspekcji danych maszyn, wymian zapobiegawczych itp.).

### **Bibliografia**

1. Are Lip Seals Obsolete? Publikacja nr 323037 firmy Inpro/Seal Company, 2006.
2. Roddis A.: Reducing moisture contamination in bearing lubrication. Publikacja nr AES/TECPAP/TP 2411 firmy AESSEAL plc, 2005.
3. Papoulis A., Pillai S.U.: Probability, Random Variables and Stochastic Processes. McGraw-Hill, 2002.

Recenzent:  
**Czesław KUNDERA**

### **Reliability of lip-type seals**

#### **Key words**

Lip-type seals, failure mechanism of lip seals, probability density function, reliability function, quantiles.

#### **Summary**

The paper describes reliability of lip-type seals, the most popular and most often used seals for rotating shafts. In the paper, a mechanism of seal failure was explained as well as its impact on others elements of mechanical systems.

On basis of data from technical literature, these seals have two basic reliability functions, probability density function and reliability function. The random variable, which describes failures of lip seals, has a Gauss distribution. So

the probability density function is a “bell” curve. The reliability function of the seals was given in an analytical form with an error function.

The resulting functions were presented in their graphical forms as well.

On the strength these functions, the probability density function, and the reliability function, the numerical values of the seal quantiles were calculated. It was done for a single lip seal as well as some systems of lip seals.

The paper is ended with conclusions.