

Aleksandra REWOLIŃSKA, Karolina PERZ

e-mail: aleksandra.rewolinska@put.poznan.pl

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska, Poznań

Przykład doboru uszczelnienia czołowego do wybranego zastosowania w przemyśle spożywczym**Wstęp**

Uszczelnienia czołowe są intensywnie rozwijającą się grupą uszczelnień obrotowych. Spotyka się różne rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe. Obszar zastosowań uszczelnień czołowych jest bardzo szeroki, od kosmicznej próżni do ciśnień kilkudziesięciu MPa, od temperatury ciekłego helu do temperatur 300÷400°C, a przy czym uszczelniają wały obracające się z prędkościami kilkudziesięciu tysięcy obrotów na minutę [Gawliński, 1989; Mayer, 2013].

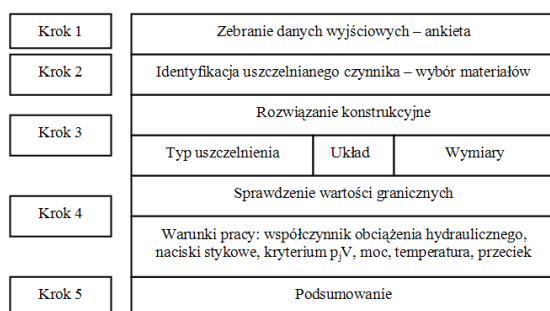
Projektanci chętnie wybierają uszczelnienia czołowe, ponieważ mają one niskie opory ruchu, są trwałe i odznaczają się dużym stopniem szczelności. Dobór uszczelnienia czołowego jest zależny od warunków jego pracy, czyli od rodzaju uszczelnianego urządzenia, właściwości uszczelnianego czynnika, jego temperatury czy ciśnienia [Roddis, 2009; Goodrich, 2010].

Istnieje duża różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych uszczelnień czołowych, co z jednej strony ułatwia dobór z drugiej zaś go komplikuje. Wykorzystując zaproponowany we wcześniejszym opracowaniu algorytm [Rewolińska, 2013] przedstawiono w pracy przykładowy dobór uszczelnienia czołowego do pompy wirowej transportującej wodę.

Algorytm doboru uszczelnień czołowych

Uszczelnienia czołowe można rozpatrywać jako obiekt poddany działaniu określonych wymuszeń, takich jak właściwości uszczelnianego czynnika, jego ciśnienie i temperatura. Użytkownika będzie interesować ilość wyciekającego czynnika ze szczeliny płaskorównoległej, wydatek mocy na pokonanie oporów czy intensywność zużycia powierzchni ślizgowych.

Identyfikacja wielkości wejściowych i jakościowa ocena ich wpływu pracę uszczelnienia jest szczególnie zalecana podczas konstruowania uszczelnienia lub przy jego wyborze z katalogu dla warunków pracy odbiegających od typowych. Zaproponowany algorytm (Rys. 1) wraz z prostym przykładem może służyć pomocą przy doborze oraz użytkowaniu uszczelnienia czołowego.



Rys. 1. Algorytm doboru uszczelnień czołowych

Krok 1

Zebranie danych startowych zwykle umożliwia ankieta producenta uszczelnień np. zamieszczana na stronie internetowej [Anga, 2017]. Przykładowa ankieta, składa się z trzech części – pierwszej dotyczącej informacji o urządzeniu, w którym ma być zainstalowane uszczelnienie, drugiej – z charakterystyką uszczelnianej cieczy oraz trzeciej – dotyczącej wymiarów instalacyjnych uszczelnienia. Ankieta zawiera takie wybrane dane jak:

Charakterystyka urządzenia

Pompa – tłoczy czystą wodę wykorzystywaną w stacji mycia CIP

Położenie wału: Poziome

Obroty: Prędkość obrotowa 3000 obr/min

Ciśnienie wewnątrz dławnicy $p_{omax} = 5$ MPa, $p_{o-ciagle} = 0,5$ MPa

Charakterystyka cieczy roboczej:

Rodzaj cieczy: woda, temperatura pracy: 40°C

Lepkość dynamiczna 0,001 N·s/m²

Wymiary instalacyjne:

- średnica wału (tulei) $d = 60$ mm

- średnica dławnicy $d_{dl} = 85$ mm

Krok 2

Rodzaj uszczelnianego czynnika w stosunkowo niewielkim stopniu wpływa na postać konstrukcyjną samego uszczelnienia czołowego, natomiast przesądza o wyborze materiałów na poszczególne elementy uszczelnienia. Właściwości czynnika uszczelnianego decydują także o sposobie rozwiązania całego węzła uszczelniającego. Podczas wyboru materiału na poszczególne elementy brane są pod uwagę: własności korozyjne, własności smarne, np. zwilżenie, lepkość, stopień zanieczyszczenia cząstkami stałymi. Poszczególne elementy uszczelnienia dla przedstawionych warunków wykonane są z następujących materiałów: pierścień obrotowy – węgiel impregnowany antymonem, pierścień oporowy – węgiel wolframu, uszczelnienie wtórne (O-ring) – nityl, pozostałe elementy – stal kwasoodporna. Temperatura czynnika uszczelnianego jest tym parametrem, który sprawia najwięcej problemów konstruktorom i użytkownikom uszczelnień. Nie bez znaczenia jest temperatura czynnika, od której zależy trwałość uszczelnienia oraz koszt samego uszczelnienia i układu wspomagającego jego działanie.

Krok 3

Dla danych warunków pracy wybrano uszczelnienie czołowe z obracającą się obudową, osadzone wewnątrz kadłuba z hydraulicznym odciążeniem. Dla średnicy wału $d = 60$ mm można dobrać gotowe uszczelnienie z katalogu wybranej firmy produkującej uszczelnienie. Jednak w przypadku obliczania podstawowych wymiarów uszczelnienia tok postępowania jest następujący:

– średnica wew. pierścienia obrotowego $D_{OB} = d + 1,5 = 61,5$ H11 mm,
– średnica wew. pierścienia oporowego $D_{OP} = D_{OB} + 0,5 = 62$ H11 mm,
– zewnętrzna średnica powierzchni uszczelniającej pierścienia oporowego po przyjęciu szerokości $l = 4$ mm,

– zewnętrzna średnica pierścienia obrotowego

$$D_2 = D_{OB} + 2l = 62 + 8 = 70 \text{ mm},$$

– powierzchnia uszczelniająca $F = \frac{\pi(D_2^2 - D_{OP}^2)}{4} = 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

– współczynnik obciążenia hydraulicznego pierścieni $k = 0,65$ (jest to uszczelnienie odciążone, co oznacza, że nacisk stykowy wynosi 65% nacisku, jaki występowałby w takim samym uszczelnieniu nieodciążonym),

– powierzchnia uszczelniająca czynna

$$F_{cz} = k \cdot 8,6 \cdot 10^{-4} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

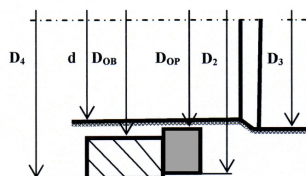
– średnica uskoku wału $D_3 = \sqrt{D_2^2 - \frac{4F_{cz}}{\pi}} = 65 \text{ mm} = 65H8$

– grubość pierścienia obrotowego przyjęto jako $g = 15$ mm,

– zewnętrzna średnica pierścienia obrotowego wynosi

$$D_4 = D_3 + g = 80 \text{ mm}$$

Objaśnienia wielkości geometrycznych charakteryzujących uszczelnienie czołowe zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Podstawowe wymiary geometryczne dobrego uszczelnienia

Krok 4

Sprawdzenie granicznych wartości parametrów eksploatacyjnych uszczelnienia takich jak: ciśnienie, temperatura i prędkość w odniesieniu do zastosowanych materiałów i rozwiązań. Prędkość obrotowa wału pompy oraz jego średnica determinują prędkość obwodową, która w znacznym stopniu wpływa na ilość wytwarzanego ciepła w szczelinie. Wraz ze wzrostem prędkości obwodowej wzrasta częstość drgań pierścieni, sprężyn i innych elementów uszczelnienia. Prędkość obwodowa nie wpływa na postać konstrukcyjną, ale nakłada pewne ograniczenia [Gawliński, 2002].

Określenie nacisków stykowych:

$$p_j = p_o(k - b) + p_s$$

przy czym $b = 0,5 \div 0,8$ – współczynnik rozkładu ciśnienia czynnika uszczelnianego w szczelinie, a dla uszczelniania wody i uszczelnienia bez przepływania $b = 0,5$ zatem:

$$p_j = 0,5(0,65 - 0,5) + 0,2 = 0,28 \text{ MPa}$$

$$p_{j\max} = p_{o\max}(k - b) + p_s = 0,95 \text{ MPa}$$

$$p_{j\min} = p_o(k - b) + p_s \quad (p_o = 0)$$

$$p_{j\min} = 0,2 \text{ MPa}$$

Nacisk stykowy p_j wzrasta wraz ze wzrostem zarówno ciśnienia czynnika p_o , jak i współczynnika obciążenia k . Z powyższego równania wynika, że nacisk nie zależy od powierzchni styku pierścieni ślizgowych. Szerokość ta wynika przede wszystkim z potrzeby zapewnienia pierścieniowi odpowiedniej wytrzymałości, aby nie doszło do zmiany kształtu szczeliny uszczelniającej. W miejscach gdzie spodziewane jest odkształcenie pierścienia, należy stosować większą wartość współczynnika obciążenia [Gawliński, 2002].

Kryterium p_jV (naciski stykowe – prędkość ślizgania)

Często to kryterium jest stosowane do oceny czasu pracy uszczelnienia w danych warunkach i pośrednio do oceny odporności na zużycie. Zamiast nacisku jednostkowego, zwykle dla ułatwienia, używa się ciśnienia czynnika uszczelnianego p_o , a zamiast prędkości ślizgania – prędkości obwodowej wału. Prędkość ślizgania wyznacza się ze wzoru:

$$V = \frac{\pi \frac{D_{OP} + D_2}{2}}{6000} n = 10 \text{ m/s}$$

Wartości kryterium p_jV w zależności od p_o podano w tab. 1:

Tab. 1. Wartości kryterium p_jV w zależności od p_o

p_o , [MPa]	0,5	0	5
kryterium p_jV , [MPa] [m/s]	2,8	2	9,5

Wartości p_jV są wyznaczane dla określonego czasu pracy uszczelnienia, pary materiałów pierścieni, rodzaju uszczelnienia oraz ogólnych warunków pracy, np. temperatur, ciśnień, prędkości. Zwykle producenci uszczelnień podają wykresy oraz tabele dotyczące możliwości zastosowania w danych warunkach określonych materiałów (Tab. 2).

Tab. 2. Przykładowe wartości iloczynu p_jV [Kondakow, 1975]

Materiał pierścienia oporowego	Materiał pierścienia obrotowego	p_jV [MPa·m/s]
Węgiel	Ceramika	24,52
Węgiel	Węgiel wolframu	122,59
Węgiel	Węgiel krzemu	147,11
Węgiel wolframu	Węgiel krzemu	24,92

Jako materiały na pierścienie wybrano węgiel wolframu oraz węgiel, co powinno pozwolić na bezpieczną pracę uszczelnienia przez 2 lata.

Moc wydatkowana na pokonanie oporów tarcia:

$$N_T = f F p_j V = 3,71 \text{ W}$$

gdzie: $f = 0,07$ jest współczynnikiem tarcia dla wybranej pary materiałów.

Na ilość wytwarzanego ciepła tarcia w szczelninie większy wpływ ma prędkość obwodowa niż obciążenie wynikające z działania ciśnienia czynnika. Z wystarczającą dla praktyki inżynierskiej dokładnością można przyjąć, że całkowita energia wydatkowana na pokonanie oporów związanych z ruchem powierzchni zostaje zamieniona na ciepło.

Temperatura powierzchni uszczelniających jest obliczana ze wzoru [Gawliński, 1989a]:

$$T = \frac{f p_{o\max} V}{\alpha} + t_{cz} \quad T = 26,6 + 40 = 66,6^\circ\text{C}$$

gdzie:

- f – współczynnik tarcia,
- $p_{o\max}$ – maksymalne ciśnienie wewnątrz dławnicy,
- V – prędkość ślizgania,
- t_{cz} – temperatura uszczelnianego czynnika,
- α – współczynnik przyjmowania ciepła pierścienia oporowego.

Wielkość przecieku

$$Q = \frac{\pi r h^3 p_o}{6 \eta b} \quad b = \frac{D_2 - D_1}{2}$$

- r – promień powierzchni uszczelniającej,
- h – wysokość szczeliny uszczelniającej ($h = 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}$)
- η – lepkość dynamiczna uszczelnianej cieczy ($\eta = 0,001 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$)

$$Q = 1,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s} = 0,06 \text{ ml/h}$$

Do oceny jakości konstrukcji uszczelnienia i węzła uszczelniającego stosuje się głównie dwa kryteria: bezpieczeństwo i niezawodność. Pierwsze kryterium jest podstawowym, gdy płynem jest np. benzen, siarkowodór czy fluorowodór. Z kolei kryterium niezawodności odnoszone jest do uszczelnień i węzłów przenoszących ciecz o właściwościach żrących, ściierających, o wysokiej lepkości lub twardejących, krystalizujących lub rozkładających się pod wpływem oddziaływania powietrza.

Podsumowanie

Przedstawiona analiza i dobór uszczelnienia ma charakter bardzo uproszczony. W rzeczywistości istnieje ogromna różnorodność rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych uszczelnień czołowych.

Wybór danego rozwiązania powinna poprzedzić szczegółowa analiza uwzględniająca wszystkie czynniki mające wpływ na pracę danego rozwiązania. Pominięcie istotnego wymagania przy doborze uszczelnienia jest przyczyną niezadowolającej późniejszej pracy uszczelnienia.

LITERATURA

ANGA. *Uszczelnienia mechaniczne*, (2017). *Formularze kontaktowe* (09.2017) http://www.anga.com.pl/kontakt/formularze_kontaktowe

Gawliński M., (1989a). Uszczelnienia czołowe – konstruowanie i eksploatacja. Część I. *Sterowanie i Napęd Hydrauliczny*, 5, 1-22

Gawliński M., (1989b). Uszczelnienia czołowe – konstruowanie i eksploatacja część II. *Sterowanie i Napęd Hydrauliczny*, 6, 11-18

Gawliński M., (2002) Uszczelnienia czołowe część II. *Pompy Pompownie* 4(107), 50-52

Goodrich M., (2010). A pump seal selection guideline complementing ISO 21049/ API 682. *Sealing Technol.*, 7, 8-12. DOI: 10.1016/S1350-4789(10)70350-0

Kondakow L.A., (1975). *Uszczelnienia układów hydraulicznych*. WNT, Warszawa

Mayer E., (2013). *Mechanical seals*. Butterworth-Heinemann

Rewolińska A., (2013). Problem doboru materiałów na elementy uszczelnień czołowych stosowanych w maszynach i urządzeniach przemysłu spożywczego. *Inż. Ap. Chem.*, 52(2), 105-106

Roddiss A., (2009). Mechanical seal selection for VSDs. *World Pumps* 511, 34-36. DOI: 10.1016/S0262-1762(09)70143-9