



Metody wizualizacji ruchu smaru w uszczelnieniach labiryntowych

AUTOR: Jan Duenas-Dobrowolski^{a,*}

REKOMENDOWANE PRZEZ: Marek Gawliński

^a Zakład Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych, Instytut Inżynierii Lotniczej, Procesowej i Maszyn Energetycznych, Politechnika Wrocławska

* Adres do korespondencji: jan.duenas@pwr.edu.pl, tel. 71 320 23 73

STRESZCZENIE

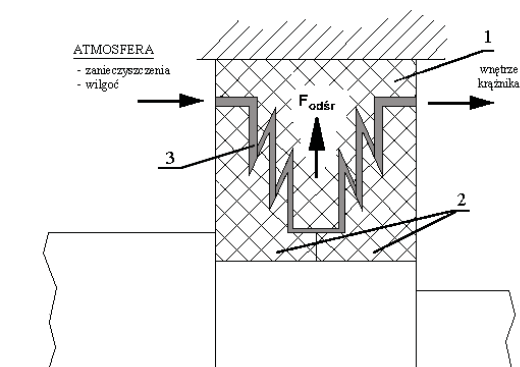
W pracy omówiono znaczenie smaru w uszczelnieniach bezstykowych oraz jego zachowanie w szczelinie uszczelnienia. Zadaniem uszczelnienia bezstykowego jest ochrona komory łożyskowej krążników taśmociągów górniczych przed wnikaniem wilgoci i zapylenia. Niestety w szczelinie wypełnionej smarem występuje zjawisko rozwarstwiania i wycieku smaru wskutek naprężeń stycznych wynikających z ruchu części obrotowej uszczelnienia i powstania nowej szczeliny co zmniejsza trwałość krążników. Celem tej pracy jest zwiększenie skuteczności uszczelniania bez zwiększania lub minimalnie zwiększając opór ruchu smaru w szczelinie uszczelnienia, a także znalezienie sposobu zapobiegania wystąpienia zjawiska rozwarstwiania i wycieku smaru. Do osiągnięcia powyższych celów przygotowano stanowisko pomiarowe do badań charakterystyki i szczelności uszczelnienia oraz konstrukcję uszczelnienia bezstykowego odśrodkowego działania. Przeprowadzono pomiary termowizyjne celem wyznaczenia rozkładu temperatury w smarze pracującego uszczelnienia. Wzrost temperatury smaru wynika z obecności naprężeń stykowych i tarcia w poszczególnych warstwach smaru. Na końcu zaprezentowano dwie metody wizualizacji ruchu smaru: metodę mikroanemometrii obrazowej oraz numeryczną analizę przepływu CFD.

SŁOWA KLUCZOWE: *uszczelnienie bezstykowe, smar plastyczny, krążnik, zjawisko rozwarstwiania i wycieku smaru, mikroanemometria obrazowa (μ PIV), numeryczna analiza przepływu (CFD)*

1. WPROWADZENIE

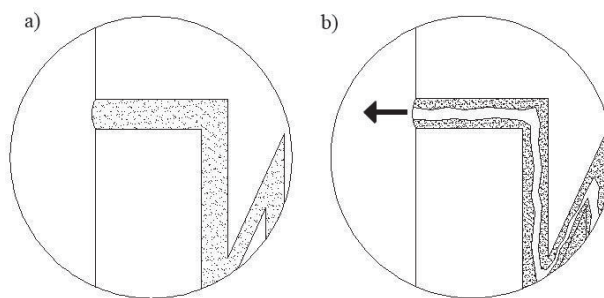
Uszczelnienie labiryntowe jest urządzeniem bezstykowym składającym się z przynajmniej jednego elementu obrotowego i jednego nieruchomego. Pomędzy tymi elementami znajduje się szczelina, która jest zaprojektowana w celu zapobiegania wejścia zanieczyszczeń i wilgoci do komory łożyskowej krążnika. Tego rodzaju uszczelnienia są szeroko stosowane w krążnikach taśmociągów górniczych w celu ochrony łożysk tocznych. Inne rozwiązania, takie jak uszczelnienia wargowe zapew-

nią dobrą ochronę przed zanieczyszczeniami, lecz niestety są to urządzenia kontaktowe, więc tarcie takiego uszczelnienia z obracającym się wałem skutkuje wysokim zużyciem energii. Ograniczenie oporu ruchu jest niezwykle istotne zwłaszcza w krążnikach taśmociągów górniczych, gdzie liczba krążników jest ogromna.



Rys. 1. Uszczelnienie labiryntowe odśrodkowego działania wypełnione smarem plastycznym: 1- część obrotowa uszczelnienia, 2- części nieruchome uszczelnienia, 3- smar umieszczony w szczelinie

Skuteczność uszczelnienia labiryntowego jest podwyższona tylko w pewnym stopniu przez siłę odśrodkową F_c wywołaną ruchem obrotowym i przyłożoną do cząstek zanieczyszczeń w celu odrzucenia ich w sposób promieniowy na zewnątrz zanim przedostaną się przez uszczelnienie. Wypełnienie szczeliny uszczelnienia bezstykowego smarem (rys. 1) prowadzi do podwyższenia stopnia szczelności ale równocześnie zwiększa opór tarcia podczas obracania się krążnika.



Rys. 2. Efekt rozwarstwiania i wycieku smaru ze szczeliny uszczelnienia bezstykowego odśrodkowego działania. a) szczelina wypełniona smarem po montażu uszczelnienia, b) wyciek smaru wskutek naprężeń stycznych i siły odśrodkowej uszczelnienia

Niestety, w szczelinie uszczelnienia wypełnionego smarem mają miejsce również zjawiska niekorzystne, takie jak zjawisko rozwarstwiania i wycieku smaru wywołane siłą ścinania i odśrodkową w krążniku (rys. 2). Smar zwilża dwie powierzchnie tworzące szczelinę w uszczelnieniu, co zwiększa przyczepność do obu powierzchni. Gdy dochodzi do ruchu krążnika, po stronie ruchomej uszczelnienia następuje płynięcie

smaru, a jego gradient ścinania występuje w pewnej części wysokości szczeliny, natomiast na pozostałej części występuje brak ruchu smaru. Wskutek tego zjawiska, pewna część smaru wypływa z uszczelnienia i powstaje szczelina mniejsza od początkowej, ale wystarczająca aby czynnik atmosferyczny dostał się do komory łożyskowej krążnika.

R. Czarny wykazał [1], że materiał jak i parametry powierzchni stykającej się ze smarem mają ogromny wpływ na jego zachowanie w szczelinie ponieważ warstwa przysięcienna niektórych materiałów, takich jak stal, żeliwo oraz stopy miedzi bardziej oddziałują na smar, przy czym im większe jest oddziaływanie tym mniejsze jest naprężenie styczne na styku smar-powierzchnia. Zagęszczacz smaru osadza się na powierzchni ścianki, a olej bazowy o mniejszej lepkości pozostaje z dala od ścianki na pewnej wysokości szczeliny (Może to być wytłumaczenie zjawiska rozwarstwiania i wycieku smaru). Tworzywa sztuczne, takie jak politetrafluoroetylen (PTFE) oraz poliamid (PA) prawie nie oddziałują na cząsteczki zagęszczacza smaru i opór przepływu jest wówczas mniejszy.

2. BADANIA CHARAKTERYSTYKI I SZCZELNOŚCI USZCZELNIENIA

Przed przedstawieniem metod wizualizacji ruchu smaru warto zrozumieć dlaczego jego ruch w szczelinie uszczelnienia jest tak ważny oraz w jaki sposób można zoptymalizować uszczelnienie aby nie występowało zjawisko rozwarstwiania i wycieku smaru. Pierwszym krokiem w tym kierunku było wyznaczenie parametrów reologicznych czterech smarów nowej generacji stosowanych jako wypełnienie uszczelnienia w celu określenia charakterystycznych dla nich modeli płynięcia. Kolejnym krokiem będzie wyznaczenie charakterystyki uszczelnienia odśrodkowego działania wypełnionego smarem, czyli zależność momentu obrotowego od prędkości obrotowej, spadku momentu obrotowego w czasie oraz ocena stopnia szczelności uszczelnienia w środowisku zapyłonym i wodnym. Wszystkie te badania zostaną przeprowadzone na przedstawionym poniżej stanowisku (rys. 3).



Rys. 3. Stanowisko do badania szczelności uszczelnień zespołów obrotowych maszyn

Badanie charakterystyki uszczelnienia labiryntowego dotyczyć będzie uszczelnienia bez wypełnienia oraz z wypełnieniem szczeliny smarem plastycznym. Charakterystyki będą wyznaczone przy 11 różnych prędkościach obrotowych. Częstość obrotów będzie zmieniana w zakresie od 100 do 1000 obr/min, a mierzone będą odpowiadające im wartości momentu obrotowego.

Kolejne badania będą realizowane w celu wyznaczenia spadku momentu oporu tarcia w czasie przy stałej wartości prędkości obrotowej. W tym przypadku badania będą trwały do czasu gdy wartość momentu obrotowego będzie niezmienna w czasie.

Na końcu badany będzie stopień szczelności uszczelnienia niewypełnionego oraz wypełnionego smarem plastycznym w obecności talku lub wody. Stopień penetracji danego czynnika zostanie określony w wyznaczonym przedziale czasu pracy.

Wszystkie wyżej omówione badania zostaną przeprowadzone w temperaturze otoczenia.

3. OCENA ROZKŁADU TEMPERATURY W WARSTWIE SMARU WYPEŁNIAJĄCEGO USZCZELNIENIE

W celu wykazania, że wskutek ruchu obrotowego, tarcie wewnętrzne smaru powoduje wzrost temperatury i spadek lepkości, wykonano zdjęcia termowizyjne przedstawiające rozkład temperatury smaru w uszczelnieniu. Zdjęcia termowizyjne zostały wykonane dla uszczelnienia w spoczynku i w ruchu oraz w wyznaczonych odstępach czasowych.

Przed wykonaniem zdjęć termowizyjnych, określona ilość smaru została umieszczona w środkowej szczelinie płasko-równoległej uszczelnienia (rys. 4).

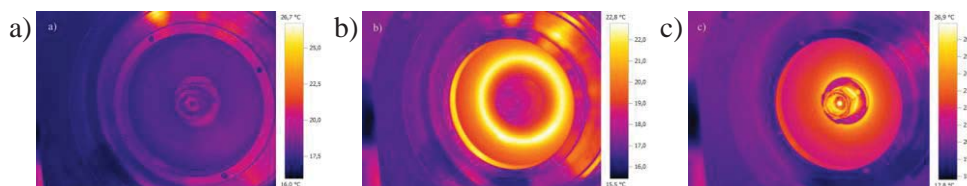


Rys. 4. Miejsce umieszczenia smaru w uszczelnieniu przed montażem na wale stanowiska

Po zamontowaniu na stanowisku badawczym wykonano pierwsze zdjęcia uszczelnienia pozostającego w spoczynku. Następnie wprowadzono uszczelnienie w ruch obrotowy, a zdjęcia termowizyjne wykonywano w odstępach czasowych $\Delta t=5$ min, częstość obrotów była zmieniana w zakresie od 100 do 1000 obr/min.

Jak widać na zdjęciach termowizyjnych (rys. 5) smar pod wpływem ruchu obrotowego uszczelnienia nagrzewał się wskutek jego tarcia wewnętrzного tworząc pierścien o największej temperaturze, który z upływem czasu rozszerzył się. Nagrzewanie

następowało do chwili, w której temperatura na całym uszczelnieniu się ustabilizowała, a potem zaczęła bardzo powoli spadać. Może to oznaczać, że smar się rozwarstwia i dochodzi do jego wycieku, a także do zaniku tarcia wewnętrznego i zwiększenia nieszczelności. W celu potwierdzenia tego zamierzono wykonać zdjęcia termowizyjne przy dłuższych czasach pracy uszczelnienia.



Rys. 5. Zdjęcia termowizyjne uszczelnienia wypełnionego smarem w temperaturze otoczenia $t_{ot}=17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
 a) przy $n=0\text{ obr/min}$, b) po czasie $t_1=5\text{ min}$; $n=300\text{ obr/min}$, c) po czasie $t_2=30\text{ min}$; $n=1000\text{ obr/min}$

4. METODY WIZUALIZACJI RUCHU SMARU

Przedstawione poniżej metody pozwalają w sposób zadowalający wizualizować ruch smaru w szczelinie uszczelnienia labiryntowego.

Wizualizacja powinna zostać przeprowadzona w zakresie temperatur i obrotów panujących w krążnikach:

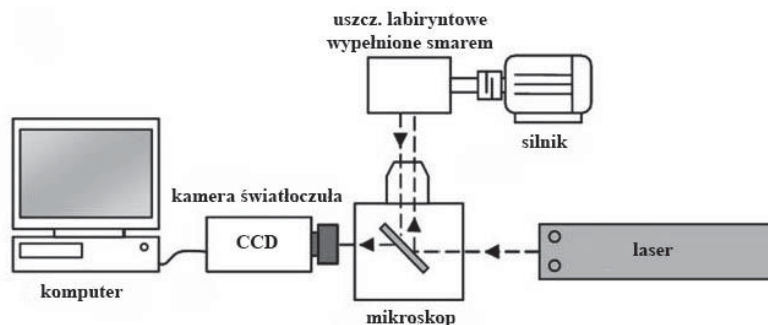
- temperatura: $T=-20\div 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- prędkość obrotowa: $n=400\div 700\text{ obr/min}$,
- wysokość szczeliny uszczelnienia: $h=0,5; 1\text{ oraz }1,5\text{ mm}$.

4.1. MIKROANEMOMETRIA OBRAZOWA (μPIV)

Mikroanemometria obrazowa jest dosyć nową metodą monitorowania ruchu płynów znajdujących się w przewodach/szczelinach o różnej geometrii. Dzięki tej metodzie, można w dokładny sposób określić profile prędkości smarów w szczelinie uszczelnień bezstykowych. Metoda ta została już wcześniej użyta w celu określenia profili prędkości smaru w różnych konfiguracjach. Stanowisko badawcze (rys. 6) składa się ze światłoczułej kamery o wysokiej prędkości zapisu, która jest podłączona do mikroskopu optycznego o powiększeniu do 10x, zwierciadło mikroskopu skierowane jest do uszczelnienia wypełnionego smarem wykonanego z przezroczystego materiału, którego część obrotowa napędzana jest za pomocą silnika. Źródłem światła jest laser impulsowy, którego wiązka kierowana jest do badanego smaru wymieszanego z "traserami ruchu", jak np. rodamina B. Cząsteczki tego barwnika fluorescencyjnego powinny być jak najmniejsze (do $0,2\text{ }\mu\text{m}$) żeby nie wpływać na parametry ruchu smaru. Wszystkie dane zapisywane są na komputerze.

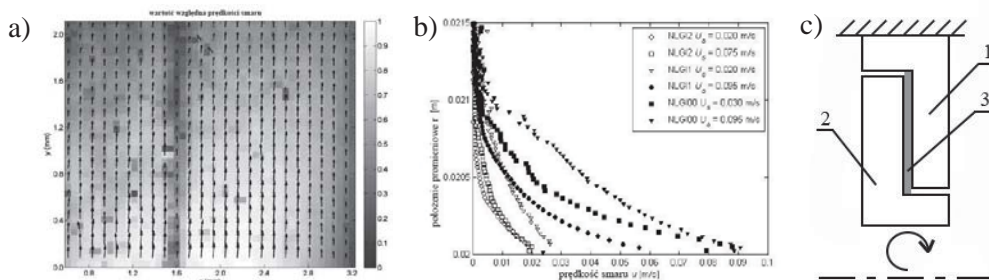
Omówiona metoda okazuje się bardzo skuteczna do określania profili prędkości smaru w różnych geometriach i jest często stosowana. Autorzy publikacji [2] określili profile prędkości smaru w uszczelnieniach wargowych osiowych i promieniowych (rys. 7a-b). W publikacji [3] autorzy stosowali tę metodę w uszczelnieniach labiryntowych promieniowych. W publikacji [4] autorzy przedstawili profile prędkości smaru w rurze prostokątnej w której znajdują się przeszkody. Taką konfigurację można zo-

baczyć w łożyskach ślizgowych podczas dosmarowywania. W tym przypadku ruch smaru utrudniony jest przez pierścienie prowadzące oraz inne elementy łożyska. W publikacji [5] pokazany jest wpływ prędkości obrotowej, konsystencji smaru oraz temperatury na profil prędkości smaru. Również przedstawiony jest model ruchu promieniowego cząstek zanieczyszczeń w uszczelnieniach labiryntowych promieniowego działania.



Rys. 6. Widok ogólny stanowiska do wizualizacji ruchu smaru [2]

We wszystkich powyżej omówionych publikacjach smar został wprowadzony pod ciśnieniem w sposób ciągły do uszczelnienia. Różnica pomiędzy uszczelnieniami przedstawionymi powyżej, a uszczelnieniem stosowanym do badań w pracy doktorskiej jest taka, że zapewnianie szczelności wymaga ciągłej obecności smaru w szczelinie. Smar traktowany jest jako element konstrukcyjny uszczelnienia labiryntowego. Mikroanemometria obrazowa zostanie wykorzystana w celu zaobserwowania zjawiska rozwarstwiania i wycieku smaru oraz pozwoli określić wpływ materiału, chropowatości i powłoki niezwilżającej smar na jego zachowanie w szczelinie uszczelnienia labiryntowego odśrodkowego działania (rys. 7c).



Rys. 7. a) rozkład względnej prędkości smaru w szczelinie uszczelnienia wargowego promieniowego [2]

b) wykresy prędkości trzech smarów o różnej konsystencji w tym uszczelnieniu [2]

c) uszczelnienie odśrodkowego działania przygotowane do badań wizualizacji ruchu smaru:

- 1 część nieruchoma uszczelnienia, 2 część obrotowa uszczelnienia, 3 smar wypełniający szczelinę uszczelnienia

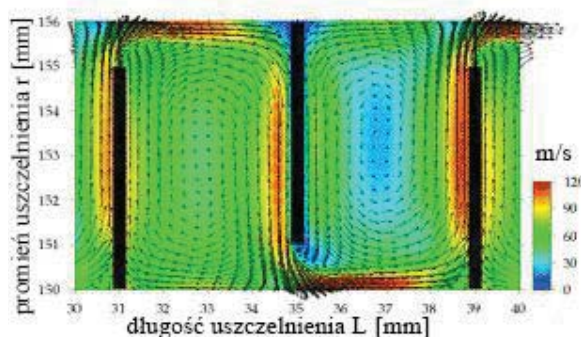
4.2. NUMERYCZNA ANALIZA PRZEPLYWU (CFD)

Metoda ta w odróżnieniu od mikroanemometrii obrazowej pozwala określić profile prędkości smaru na całej geometrii uszczelnienia (rys. 8), a nie tylko dla wybranej płaszczyzny oraz eliminuje konieczność przeprowadzenia kosztownych i czasochłonnych badań doświadczalnych.

Na przestrzeni ostatnich lat pojawiło się na rynku wiele specjalistycznych programów takich jak Ansys Fluent, Ansys CFX czy OpenFOAM, które w zależności od możliwości obliczeniowej komputera mogą zostać wykorzystane do wizualizacji ruchu smaru w szczelinie płasko-równoległej uszczelnienia labiryntowego odśrodkowego działania jak i również do zoptymalizowania jego geometrii.

Stosowanie powyższej metody w celu wizualizacji ruchu smaru jest trudnym zadaniem. Trzeba brać pod uwagę jak najwięcej zmiennych aby ruch smaru był jak najbardziej zbliżony do tego co w stanowisku badawczym. Smar jest roztworem koloidalnym, którego cząstki oleju bazowego zawieszono w siatce zagęszczacza składającego się z mydeł metalicznych i do którego stosowane są dodatki poprawiające jego właściwości. Smar jest ciałem nienewtonowskim o skomplikowanej reologii, wykazuje granicę płynięcia i warstwa przyścienna każdego materiału uszczelnienia w różnym stopniu oddziałuje na niego.

Zmienne jakie powinny zostać brane pod uwagę podczas modelowania przepływu smaru to: model reologiczny, wysokość szczeliny, chropowatość, materiał z jakiego wykonane jest uszczelnienie oraz temperatura otoczenia.



Rys. 8. Rozkład prędkości w szczelinie uszczelnienia labiryntowego otrzymany w prowadzonej analizie numerycznej

Omówiona metoda nie daje stuprocentowej pewności zaobserwowania zjawiska rozwarstwiania i wycieku smaru mimo poprawnego wprowadzenia danych, warunków brzegowych i właściwej metody siatkowania. Również nie jest wiadomo czy zaobserwowany będzie efekt przyścienny w obecności powłoki niezwilżającej smaru. Numeryczna analiza przepływu zostanie wykorzystana do wizualizacji ruchu smaru w szczelinie uszczelnienia bezstykowego przedstawionego na (rys. 8) w celu porównania wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych mikroanemometrią obrazową.

5. WNIOSKI

W tej pracy przedstawiono temat dotyczący roli smaru w uszczelnieniach bezstykowych stosowanych w krążnikach taśmociągów górniczych. Podano również, że materiał i parametry powierzchni uszczelnienia mają duży wpływ na zachowanie smaru i mogą być powodem powstania zjawiska rozwarstwiania i wycieku smaru co w efekcie prowadzi do zmniejszania skuteczności uszczelnienia. To uzasadnia podjęcie badań w kierunku obserwacji tego zjawiska. Celem końcowym będzie znalezienie metody zmniejszania oporu ruchu smaru w uszczelnieniu bezstykowym co zwiększyłoby jego szczelność.

Możliwym rozwiązaniem będzie zastosowanie specjalnej powłoki niezwilżającej smar na jednej z powierzchni płasko-równoległej uszczelnienia z wybranego wcześniej badanych materiałów, dzięki której warstwa przyścienna nie zostanie zwilżona przez smar, przez co opór tarcia smaru powinien być znikomy.

Mając komplet danych o wpływie powłoki niezwilżającej na zachowanie się smaru rozpoczęte zostaną badania charakterystyki oporu tarcia i szczelności uszczelnienia labiryntowego odśrodkowego działania jak i również wykonane będą zdjęcia termowizyjne, które powinny wykazać znikomy wzrost temperatury wskutek tarcia wewnętrznego smaru.

Na końcu profile prędkości smaru w szczelinie uszczelnienia bezstykowego zostaną wyznaczone stosując głównie mikroanemometrię obrazową oraz ostatecznie porównując wyniki obliczeń przy użyciu numerycznej analizy przepływu w celu zoptymalizowania geometrii uszczelnienia i zwiększenia skuteczności działania uszczelnienia bezstykowego odśrodkowego działania w krążnikach taśmociągów górniczych.

LITERATURA

- [1] **Czarny R.:** *Smary plastyczne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne WNT, Warszawa, 2004.
- [2] **Green T.M., Baart P., Westerberg L.G., Lundstrom T.S., Hognlund E., Lugt P.M., Li J.X.:** *A new method to visualize grease flow in a double restriction seal using microPIV*, *SLTE Tribology Transactions*, Vol. 54, Issue 6, 784–792, 2011, DOI: 10.1080/10402004.2011.604759.
- [3] **Li J.X., Westerberg L.G., Hognlund E., Lundstrom T.S., Lugt P.M., Baart P.:** *Lubricating grease shear flow and boundary layers in a concentric cylinder configuration*, 3rd International Tribology Symposium of IFToMM, Lulea, Sweden, March 2013, 45-56.
- [4] **Li J.X., Hognlund E., Westerberg L.G., Green T.M., Lundstrom T.S., Lugt P.M., Baart P.:** *MicroPIV measurements of grease velocity profiles in channels with two different types of flow restrictions*, *Tribology International*, Vol. 54, 94-99, 2012.
- [5] **Baart P., Green T.M., Li J.X., Lundstrom T.S., Westerberg L.G., Hognlund E., Lugt P.M.:** *The influence of speed, grease type, and temperature on radial contaminant particle migration in a double restriction seal*, *SLTE Tribology Transactions*, Vol. 54, Issue 6, 867–877, 2011, DOI: 10.1080/10402004.2011.609308.