



Określenie profili prędkości smaru w szczelinie uszczelnienia bezstykowego za pomocą mikroanemometrii obrazowej (μ PIV)

Jan Duenas-Dobrowolski^{a,*}

REKOMENDOWANE PRZEZ: *dr hab. inż. Marek Gawliński, prof. PWr*

^a *Zakład Podstaw Konstrukcji i Maszyn Energetycznych*

* *jan.duenas@pwr.edu.pl, tel. 48 29*

STRESZCZENIE

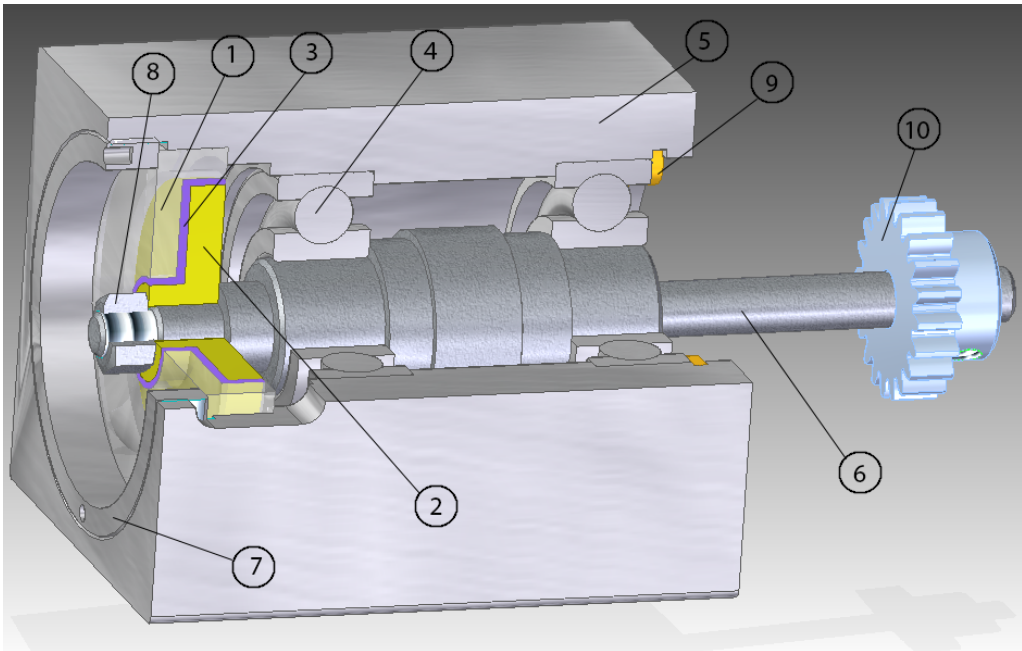
W pracy przedstawiono badania nad określeniem ruchu smaru w szczelinie uszczelnienia labiryntowego odśrodkowego działania. Metodą stosowaną do tego celu była mikroanemometria obrazowa (μ PIV). Za pomocą barwników fluorescencyjnych (traserów ruchu) wyznaczono nieliniowe profile prędkości trzech smarów litowych o różnej zawartości zagęszczacza. Mikroanemometria obrazowa jest metodą umożliwiającą śledzenie płynów nienewtonowskich w przewodach/szczelinach o różnej geometrii.

SŁOWA KLUCZOWE: *smar plastyczny, uszczelnienie bezstykowe (labiryntowe), mikroanemometria obrazowa (μ PIV), krążnik, zjawisko rozwarstwiania smaru.*

1. WPROWADZENIE

Smary plastyczne stosuje się w celu zmniejszenia tarcia i zużycia elementów pracujących w węzłach tribologicznych. W uszczelnieniach bezstykowych smary wypełniają szczelinę między elementem obrotowym a elementem nieruchomym, co zwiększa szczelność, chroniąc łożyska przed wnikaniem wilgoci i zanieczyszczeń z zewnątrz.

Uszczelnienie bezstykowe wypełnione smarem jest rozwiązaniem najczęściej stosowanym w krążnikach taśmociągów górniczych. Inne rodzaje uszczelnień, np. stykowe, są ekonomicznie nieopłacalne ze względu na duży opór ruchu, wynikający z potrzeby zastosowania dużej ilości tych uszczelnień w taśmociągach. Na rysunku 1 przedstawiono komplet elementów przygotowanych do badań w stanowisku do wizualizacji ruchu smaru, skrótowo nazywanego μ PIV.



Rys. 1: Elementy do badań na stanowisku μ PIV: 1 – część nieruchoma uszczelnienia, 2 – część obrotowa uszczelnienia, 3 – smar wypełniający szczelinę, 4 – łożysko toczne kulkowe, 5 – korpus, 6 – wałek, 7 – nakrętka dociskająca element nieruchomy uszczelnienia, 8 – nakrętka dociskająca element ruchomy uszczelnienia, 9 – pierścień sprężynujący, 10 – koło zębate

Niestety, należy pamiętać, że w szczelinie wypełnionej smarem bardzo często występuje zjawisko rozwarstwiania i wycieku smaru wskutek naprężeń stycznych wynikających z ruchu części obrotowej uszczelnienia.

Zjawisko rozwarstwiania i wycieku smaru do chwili obecnej nie zostało dobrze opisane i praktycznie nie można znaleźć informacji na temat sposobu jego zapobiegania bądź zmniejszenia. Znajomość mechanizmu zachodzącego podczas występowania tego zjawiska pozwoliłaby znaleźć sposób utrzymania smaru w szczelinie i wydłużenia okresu eksploatacji krążnika.

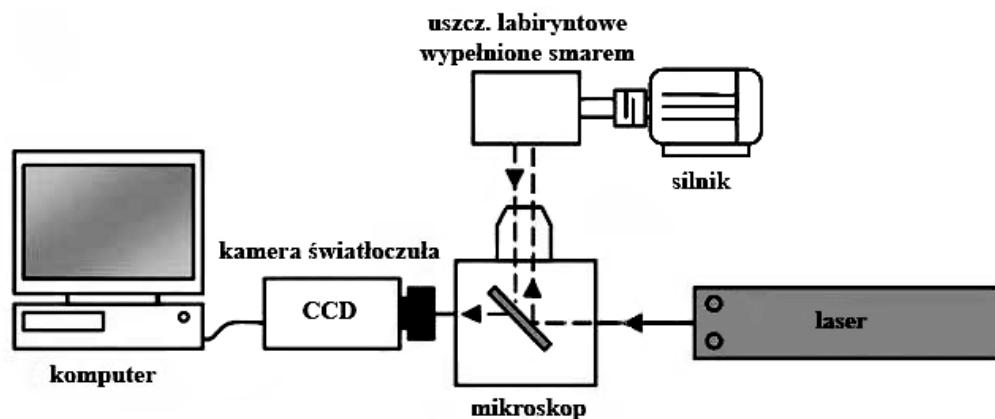
Przyjęto, że zmniejszenie oddziaływania energetycznego między smarem a powierzchnią obrotową uszczelnienia (brak zwilżalności) oraz zwiększenie poślizgu opóźniłoby proces wystąpienia zjawiska rozwarstwiania i wycieku smaru. W badaniach zastosowano dwa rodzaje powierzchni obrotowych, pierwsza wykonana z plexiglasu bez żadnego pokrycia, a druga z tego samego materiału pokrytego specjalną powłoką olejofobową.

W pracy [1] autor przedstawia wyniki badań reologicznych różnych smarów oraz proces tworzenia się dwóch warstw (powierzchniowej i przyściennej) w pobliżu ścianki materiału. Z badań wynika, że materiały termoplastyczne i aluminium 2017 mają większą zdolność do przyciągania cząstek zagęszczacza smaru, poślizg występuje dopiero w pobliżu ścianki. Mniejszą zdolność do tworzenia się warstwy powierzchniowej miały niektóre materiały elastomerowe, w których poślizg w pobliżu ścianki jest najmniejszy, a opór ruchu największy.

2. METODA BADAŃ

Badania przeprowadzono na stanowisku μ PIV. Mikroanemometria obrazowa jest nowoczesną metodą stosowaną do określenia profili prędkości płynów nienewtonowskich (smarów) w małych szczelinach. Takie szczeliny można spotkać w uszczelnieniach labiryntowych, których wysokość zwykle wynosi 0,5–1,5 mm. Omówiona metoda była wcześniej wykorzystana do monitorowania ruchu smaru w uszczelnieniach wargowych, uszczelnieniach promieniowych i przewodach rurowych [2, 3, 4, 5].

Na rysunku 2 przedstawiono schemat stanowiska μ PIV do wizualizacji ruchu smaru. Stanowisko składa się z lasera pulsacyjnego neodymowego typu Nd:YLF firmy Dantec Dynamics, który emituje światło o długości fali 528 nm. Światło lasera skierowane jest na uszczelnienie labiryntowe, w którym znajduje się smar wymieszany z barwnikami fluorescencyjnymi. Część obrotowa uszczelnienia napędzana jest za pomocą silniczka elektrycznego DC-12V, w którym przez zmianę napięcia można ustalić prędkość obrotową w zakresie 2–25 obr/min. Laser pulsacyjny zsynchronizowany jest ze światłowzłą kamerą CCD Nanosense o wysokiej prędkości zapisu. Za pomocą mikroskopu optycznego można zmienić powiększenie badanego obszaru w zakresie 5–40 x. Dzięki systemowi traverse można ustawić zarówno położenie badanej próbki w układzie współrzędnych jak również ustawić położenie zadanej płaszczyzny F_z . Należy jednak pamiętać, że ustawienie danego położenia płaszczyzny pomiaru prędkości w płynie zależy przede wszystkim od jego przezroczystości, która w przypadku większości smarów jest bardzo ograniczona. Zmiany prędkości cząstek zarejestrowanych kamerą CCD można śledzić w czasie rzeczywistym, a wyniki badań zapisywać na nośniku pamięci.

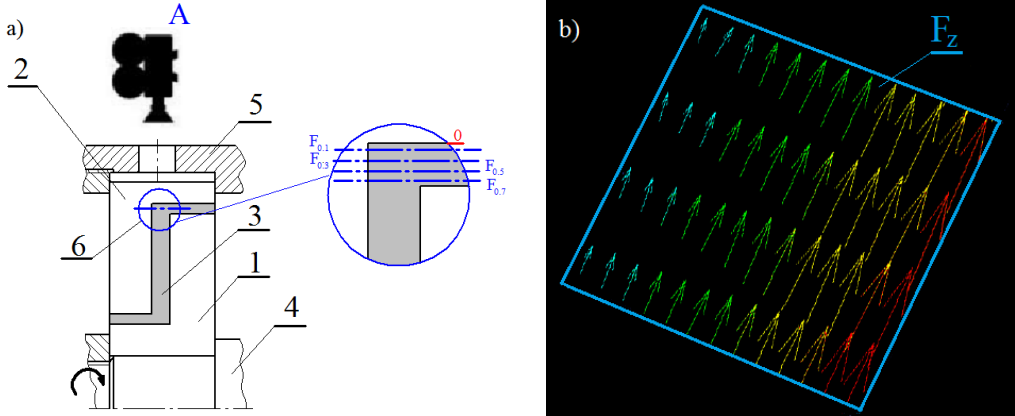


Rys. 2: Widok ogólny stanowiska μ PIV do wizualizacji ruchu smaru [2]

Wizualizację ruchu smaru przeprowadzono w modelu uszczelnienia bezstykowego odśrodkowego działania, którego płytki wykonane z plexiglasu tworzyły szczelinę płasko-równoległą o wysokości równej 1 mm, objętość smaru potrzebna do wypełnienia szczeliny wynosiła $V = 1,2$ ml. W badaniach ustalono stałą prędkość obrotową wynoszącą 15 obr/min. Badane smary zostały wymieszane z cząsteczkami rodaminu B (traserami ruchu) o wielkości $6,78 \mu\text{m}$, które wzbudzane były za pomocą światła lasera. W metodzie μ PIV założono, że prędkość traserów ruchu jest taka sama jak prędkość cząstek

smaru ponieważ, cząsteczki barwnika są bardzo małe i nie wpływają na ruch smaru.

Profile prędkości smaru zostały określone w czterech wybranych płaszczyznach oznaczonych $F_{0,1}$, $F_{0,3}$, $F_{0,5}$, $F_{0,7}$. Płaszczyzny znajdowały się w odległości 0,1; 0,3; 0,5 i 0,7 mm od strony średnicy wewnętrznej uszczelnienia nieruchomego (oznaczony jako punkt "0"). Aby ująć całą szerokość szczeliny, zastosowano powiększenie mikroskopu 10 x. Na rysunku 3.a przedstawiono uszczelnienie bezstykowe, z podanymi płaszczyznami, w których wyznaczono rozkład prędkości cząstek smaru. Na rysunku 3.b zilustrowano wynikowe wektory prędkości smaru, które wyznaczone są w kierunku stycznym względem obrotowej płytki. Badania przeprowadzono w temperaturze otoczenia.



Rys. 3: a) Uszczelnienie bezstykowe odśrodkowego działania wypełnione smarem: 1 – płytka obrotowa uszczelnienia, 2 – płytka nieruchoma uszczelnienia, 3 – smar wypełniający szczelinę uszczelnienia, 4 – wał obrotowy, 5 – korpus, 6 – smar badany w płaszczyznach $F_{0,1}$, $F_{0,3}$, $F_{0,5}$, $F_{0,7}$ za pomocą kamery A; b) Wynikowe wektory prędkości smaru na wybranej płaszczyźnie F_x

Trzy smary litowe o różnej zawartości zagęszczacza, skrótowo nazwane LG4%, LG5% i LG7%, na bazie oleju mineralnego ORLEN SN-400, zostały użyte do określenia profili prędkości. W tabeli 1 przedstawiono zawartość zagęszczacza w tych smarach oraz ocenę klasy konsystencji (wg ISO 2137):

Tab. 1: Ocena klasy konsystencji smarów o różnej zawartości zagęszczacza [6]

Smear	Zawartość zagęszczacza S_c [%]	Penetracja ugniatanego smaru w temp. 25 °C [mm/10]	Klasa NLGI
LG4%	4	381	0
LG5%	5	313	1
LG7%	7	275	2

Warto zaznaczyć, że przed każdym badaniem wypełniono szczelinę świeżym smarem z nadatkiem około 30%, aby unikać szybkiego rozwarstwiania się smaru. Do opisu ruchu smaru zastosowano trzyparametrowy model Herschela–Bulkleya, który we wcześniejszych badaniach [7], [8] z powodzeniem stosowano:

$$\tau = \tau_0 + kD^n, \quad (1)$$

gdzie:

τ – naprężenie styczne [Pa],

τ_0 – granica płynięcia [Pa],
 k – współczynnik konsystencji [$\text{Pa}\cdot\text{s}^2$],
 D – prędkość ścinania [s^{-1}],
 n – wskaźnik płynięcia [-].

Prędkość ścinania obliczono ze wzoru:

$$D = \frac{du}{dh}, \quad (2)$$

gdzie:

u – prędkość liniowa smaru [m/s],
 h – wysokość szczeliny [m].

Krzywe płynięcia badanych smarów były wcześniej wyznaczone [8]. W tabeli 2 przedstawiono parametry reologiczne smarów litowych:

Tab. 2: Parametry reologiczne smarów litowych o różnej zawartości zagęszczacza wyznaczonych w reometrze, wykorzystano do tego model Herschela–Bulkleya [8]:

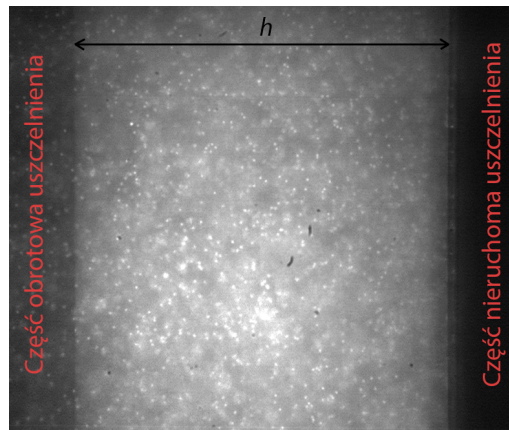
Parametry reologiczne				
Smar	Parametr	LG4%	LG5%	LG7%
LG4%	τ_0 [Pa]	120,27	190,52	672,6
LG5%	k [Pa s]	5,826	83,155	148,93
LG7%	n [-]	0,66964	0,37458	0,35189

3. METODA OBLICZEŃ I WYNIKI BADAŃ

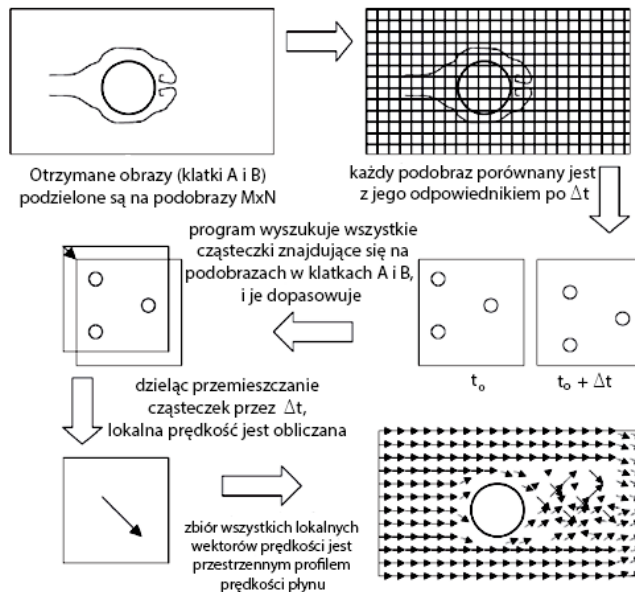
3.1. Metoda wyznaczania wektorów ruchu smaru

W układzie pomiarowym neodymowy laser dwuimpulsowy naświetlał badany obszar w określonej płaszczyźnie, a dokładniej cząsteczki barwnika fluorescencyjnego znajdujące się w składzie smaru (rys. 4). Dzięki tej metodzie można było otrzymać przestrzenny obraz przepływu smaru umieszczonego w szczelinie $h = 1$ mm. Kamera rejestrowała serię podwójnych obrazów o rozdzielczości 1280 x 1024 pikseli. Odstęp czasu pomiędzy klatkami A i B (impuls 1 i 2 lasera) każdego podwójnego zdjęcia był bardzo krótki i wynosił $\Delta t = 900\mu\text{s}$, a czas pomiędzy kolejnymi podwójnymi zdjęciami wynosił $t = 0,05$ s. Przy każdym pomiarze wykonano serię 50 podwójnych zdjęć, a pomiary powtórzono 3 razy.

Za pomocą oprogramowania, w tym przypadku Dynamic Studio v3.4, można było analizować zmianę ruchu cząstek zarejestrowanych na klatkach A i B. Pierwszym krokiem w tym kierunku było dzielenie klatek na podobrazy o wymiarze $M \times N$, a do nich zastosowano funkcję korelacji wzajemnej (ang. *Cross correlation*) dzięki czemu można było określić kierunek oraz przesunięcie liniowe wektorów cząstek smaru. Na rysunku 5 przedstawiono główny schemat procesu wyznaczenia wektorów ruchu smaru.



Rys. 4: Naświetlany laserem obszar smaru w płaszczyźnie $F_{0,5}$. Można zauważyć ścianki uszczelnienia oraz naświetlone trasyery ruchu



Rys. 5: Proces wyznaczania wektorów ruchu smaru. Podwójny obraz – klatki A i B dyskretyzowane są na mniejsze podobrazy wielkości $M \times N$. Każdy podobraz klatki A porównywany jest z jego odpowiednikiem w klatce B, dzięki czemu można określić przemieszczenie pikseli pomiędzy obrazami A i B, co daje zbiór lokalnych wektorów i przestrzenny profil prędkości [9]

Należy pamiętać, że metoda pomiaru μ PIV jest bezinwazyjna, ponieważ do smaru nie wprowadza się żadnych czujników, które mogłyby zakłócić przepływy.

3.2. Wyniki badań

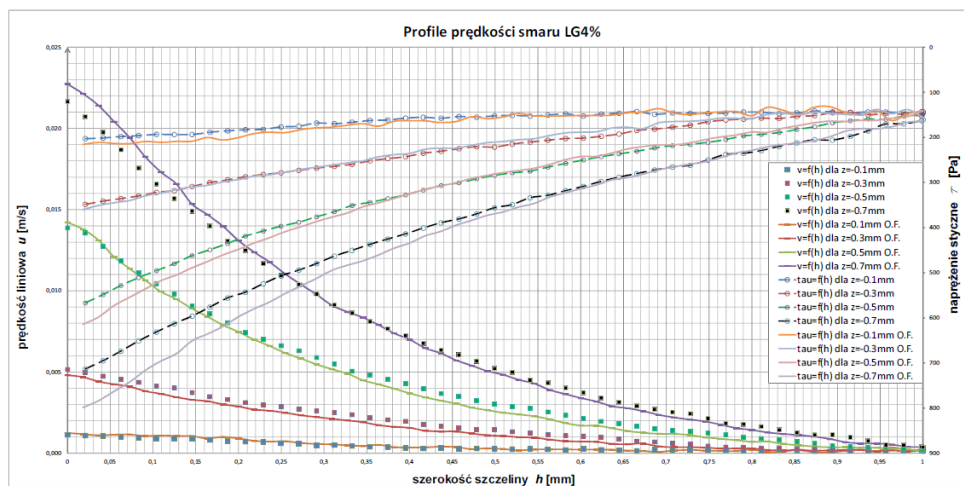
Na rysunkach 6-8 przedstawiono wyznaczone profile prędkości smarów litowych o różnej zawartości zagęszczacza w wybranych płaszczyznach $F_{0,1}$, $F_{0,3}$, $F_{0,5}$ oraz $F_{0,7}$.

W badaniach porównywano profile prędkości wywołane ruchem powierzchni pokrytych i niepokrytych powłoką olejofobową (oznaczoną jako O.F.) w celu stwierdzenia czy jej obecność wpływa w jakiś sposób na poślizg na styku smar-powierzchnia obrotowa uszczelnienia. Część obrotowa uszczelnienia znajduje się po lewej stronie (przy $h = 0$ mm) a nieruchoma po prawej (przy $h = 1$ mm).

Na rysunkach 6, 7 i 8 przedstawiono dwie funkcje: pierwsza opisuje profile prędkości smarów, czyli wyznaczoną prędkość liniową smaru w zależności od położenia w szczelinie $u = f(h)$, druga zaś jest funkcją naprężenia stycznego zależnego od położenia w szczelinie $\tau = f(h)$. W tym przypadku dopasowano model Herschela–Bulkley'a do wyników pomiarów i uzyskano wartość naprężenia stycznego. Można zauważyć, że ruch smaru w szczelinie jest nieliniowy (ciało nienewtonowskie).

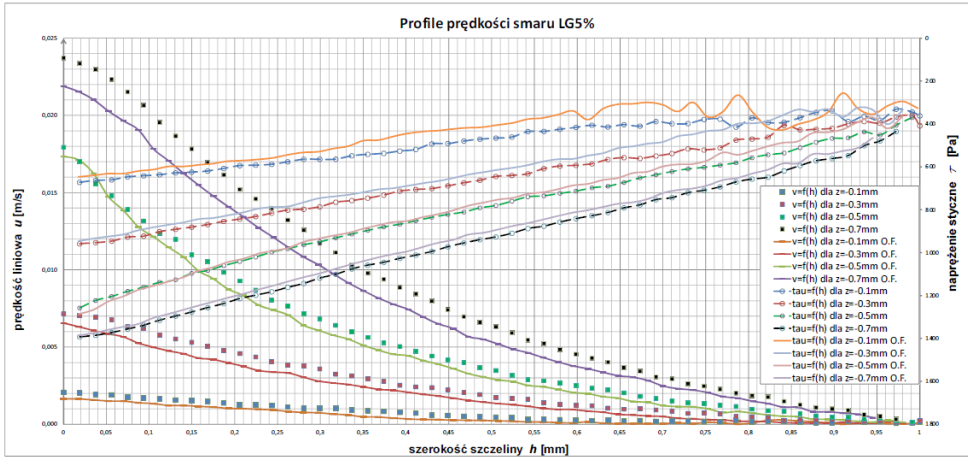
Z rysunków można odczytać, że im większa jest prędkość liniowa, tym również większe jest naprężenie styczne. Również można stwierdzić, że wszystkie badane smary na całej wysokości szczeliny są w ruchu, ponieważ wartość naprężenia stycznego w tych miejscach jest większa od wartości granicy płynięcia.

Z rysunku 6 wynika, że w przypadku smaru LG4% powierzchnia olejofobowa praktycznie nie wpływa na zmianę pola prędkości. Największą różnicę prędkości można zauważyć na głębokości $z = -0.7$ mm, wynosi ona 0,001 m/s, a różnica naprężenia stycznego wynosi 85 Pa.



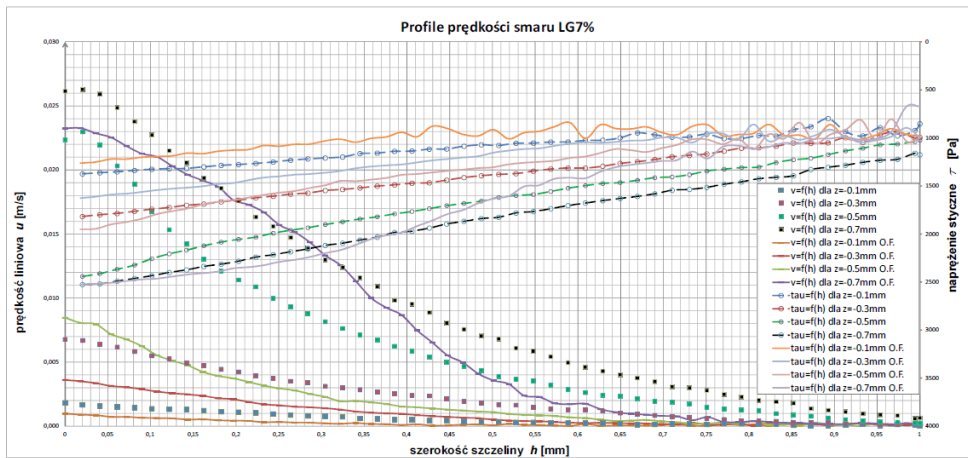
Rys. 6: Wyznaczone profile prędkości cząstek smaru LG4% oraz zależność naprężenia stycznego od wysokości szczeliny

Na rysunku 7, dla smaru LG5% różnice są większe niż w przypadku smaru LG4%, ale nie w takim stopniu, żeby mówić o poślizgu. Największą różnicę prędkości można zauważyć również na głębokości $z = -0.7$ mm, wynosi ona 0,0018 m/s. Ciekawa w tym przypadku jest liniowość funkcji $\tau = f(h)$, można zauważyć, że praktycznie nie występują różnice między przepływem wywołanym przez powierzchnią pokrytą a niepokrytą po stronie obrotowej uszczelnienia. Dla wysokości $z = -0,1$ mm na samym początku (przy $h = 1$ mm) omówiona funkcja w przypadku powierzchni pokrytej powłoką olejofobową jest bardzo niestabilna, ale w miarę przybliżenia się do części obrotowej wahania wartości naprężenia stycznego zmniejszają się.

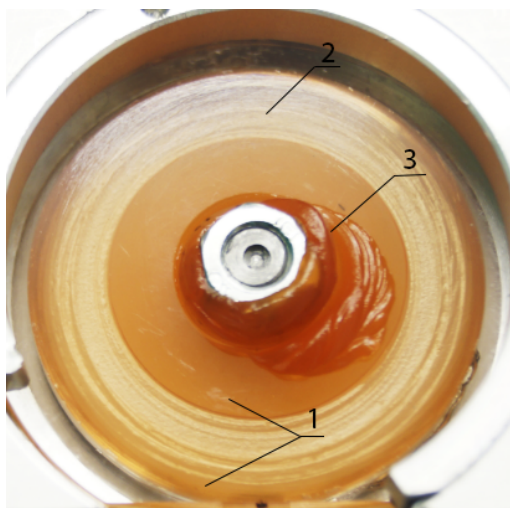


Rys. 7: Wyznaczone profile prędkości cząstek smaru LG5% oraz zależność naprężenia stycznego od wysokości szczeliny

W przypadku smaru LG7% (rys. 8) różnice prędkości są największe, ale tutaj profile prędkości raczej nie przedstawiają poślizgu, a prawdopodobnie, że smar, znajdujący się w szczeliny uszczelnienia, rozwarstwia się i dlatego profile prędkości nie są zdefiniowane. Największą różnicę prędkości można zaobserwować na głębokości $z = -0.5$ mm, wynosi ona 0,014 m/s. Funkcja $\tau = f(h)$ jest również liniowa jak w przypadku smaru LG5%, a największa różnica naprężenia stycznego, dla tej samej głębokości, wynosi 500 Pa dla powierzchni niepokrytej i pokrytej powłoką. Na rysunku 9 przedstawiono zdjęcie uszczelnienia wypełnionego smarem LG7% po badaniach, gdzie można zauważyć jego rozwarstwienie i częściowy wyciek mimo krótkiego czasu przeprowadzenia badań.



Rys. 8: Wyznaczone profile prędkości cząstek smaru LG7% oraz zależność naprężenia stycznego od wysokości szczeliny



Rys. 9: Zdjęcie uszczelnienia wypełnionego smarem LG7% po badaniach wizualizacji przepływu: 1 – smar, który nadal znajduje się w szczelinie uszczelnienia, 2 – rozwarstwiony smar wewnątrz szczeliny, 3 – smar, który wyciekł podczas badań

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono ciekawą metodę określenia profili prędkości smarów jaką jest mikroanemometria obrazowa (μ PIV). Omówiona metoda nadaje się do monitorowania ruchu smaru w szczelinie płasko-równoległej uszczelnienia bezstykowego.

W celach porównawczych do badań zastosowano dwa rodzaje płytek obrotowych wykonanych z plexiglasu, jedna niepokryta, a druga pokryta specjalną powłoką olejofobową. Przed badaniami założono, że obecność tej powłoki mogłaby zarówno obniżyć opór tarcia wynikający z ruchu smaru, jak i również zwiększyć poślizg na styku smar-powierzchnia obrotowa uszczelnienia.

Z wykresów można wywnioskować, że powłoka olejofobowa praktycznie nie wpływa na poślizg niezależnie od klasy konsystencji smaru. Największą różnicę widać dla smaru LG5%.

Warto dodać, że smar o najwyższej klasie konsystencji rozwarstwił się i wyciekł ze szczeliny mimo krótkiego czasu badania i niską prędkość obrotową (15obr/min). Dlatego na ostatnim wykresie widać niezdefiniowany profil prędkości na całej wysokości szczeliny.

Przyszłe badania skupione będą nad zjawiskiem rozwarstwiania i wycieku smaru, również zaplanowano zastosowania powłok bardziej zaawansowanych i badania energii powierzchniowej materiałów i powłok na styku smar-powierzchnia obrotowa uszczelnienia.

Celem końcowym zaplanowanych badań będzie zwiększenie skuteczności tego typu uszczelnień przez zmniejszenie oporu ruchu wywołanego poślizgiem na styku smar-powierzchnia obrotowa uszczelnienia, dzięki temu trwałość krążnika będzie zwiększona.

LITERATURA

- [1] Paszkowski M. *Effect of grease thickener and surface material on rheological properties of boundary layer*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014.
- [2] Green T.M., Baart P., Westerberg L.G., Lundstrom T.S., Hoglund E., Lugt P.M., Li J.X., *A new method to visualize grease flow in a double restriction seal using microparticle image velocimetry*, SLTE Tribology Transactions, 54 (6), 785–792, 2011.
- [3] Baart P., Green T.M., Lundstrom T.S., Westerberg L.G., Hoglund 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, 54 (6), 867–877, 2011.
- [4] Li J.X., Hoglund E., Westerberg L.G., Green T.M., Lundstrom T.S., Lugt P.M., Baart P., *μ MicroPIV measurements of grease velocity profiles in channels with two different types of flow restrictions*, Tribology International, 54, 94–99, 2012.
- [5] Li J.X., Westerberg L.G., Hoglund E., Lundstrom T.S., Lugt P.M., Baart P., *Lubricating grease flow and boundary layers in a concentric cylinder configuration*, 3rd International Tribology Symposium of IFToMM, March 2013, Lulea-Sweden.
- [6] Paszkowski M., *Assessment of the effect of temperature, shear rate and thickener content on the thixotropy of lithium lubricating greases*, Journal of Engineering Tribology, 227 (3), 209–219, 2012.
- [7] Duenas-Dobrowolski J., Gawliński M., *Wyznaczenie parametrów reologicznych smarów do uszczelnień bezstykowych*, Hydraulika i Pneumatyka, HiP 4/2013, 7-11, 2013.
- [8] Paszkowski M. *Some Aspects of Grease Flow in Lubrication Systems and Friction Nodes*, Intech - Tribology - Fundamentals and Advancements, ISBN 978-953-51-1135-1, Chapter 3, 77–105, 2013.
- [9] Green T.M. *PIV in practice*, Doctoral Thesis, Lulea University of Technology, Chapter 2, 7–16, 2011.