

USZCZELNIENIA WAŁÓW KORBOWYCH O ZMNIJSZONYCH OPORACH TARCIA

W artykule omówiona została współpraca elastomerowego pierścienia uszczelniającego z wałem pod kątem zużycia i strat na pokonanie sił tarcia, konstrukcja klasycznego uszczelnienia oraz uszczelnienia o obniżonym oporze ruchu. Ponieważ układ wargi uszczelnienia-wał to specyficzna para cierna, skoncentrowano się na lokalnych warunkach styku w skali mikro jako parametry decydującym o globalnych oporach ruchu w skali makro. Ponieważ wystąpienie przedwczesnej awarii uszczelnienia mimo niedużych kosztów samego elementu generuje poważne koszty naprawy oraz przestój taboru transportowego problem trwałości i niezawodności pracy opisywanego typu uszczelnień pozostaje wciąż aktualny.

WSTĘP

Maszyny i urządzenia tracą swoją zdolność produkcyjną często na skutek wadliwego działania lub uszkodzenia kilku drobnych elementów lub części składowych. W pojazdach uszczelnienia wałów wykonujących ruch obrotowy należą do grupy niewralgicznych elementów. Uszczelnienia, choć często niewidoczne, spełniają w wielu maszynach bardzo ważną funkcję. Celem stosowania uszczelnień jest odseparowanie wnętrza maszyny od wpływów zewnętrznych (zanieczyszczenia, wilgoć) oraz zapobieganie wydostawaniu się czynnika z wnętrza maszyny do otoczenia. Jako uszczelnienia wałów wykonujących ruch obrotowy (nie tylko wałów korbowych) powszechnie stosowane są elastomerowe uszczelnienia wargowe, które należą do grupy uszczelnień stykowych. Ich cechą charakterystyczną są straty wynikające z tarcia podczas ruchu względnego wargi i wału. Następstwem tarcia jest obciążenie cieplne elastomeru prowadzące do jego starzenia oraz w konsekwencji do uszkodzenia pierścienia uszczelniającego i wycieku czynnika z maszyny. Moc zużyta na pokonanie tarcia jest mocą traconą w urządzeniu i obniża jego sprawność. Nie mniej jednak udział strat wynikający z tarcia uszczelnień w przypadku silnika spalinowego dysponującego mocą kilkudziesięciu-kilkuset kilowatów jest zwykle pomijany. Najpoważniejszym odbiorcą uszczelnień wargowych jest przemysł motoryzacyjny. We współczesnym samochodzie z napędem spalinowym zamontowano ponad 10 wargowych pierścieni uszczelniających wały obrotowe w samym układzie napędowym. Ewentualny osprzęt dodatkowy wynikający ze specyfiki branży i specjalistycznego wyposażenia może zwiększyć ilość pierścieni uszczelniających wały do kilkunastu.

Wargowe uszczelnienia wałów obrotowych stosowane są w technice od ponad 60 lat. Ten długi czas przyniósł wiele zmian w konstrukcji samego uszczelnienia: zmniejszono szerokość styku wargi z wałem, zmniejszono siłę zacisku wargi na wale, wprowadzono zmiany konstrukcyjne mające na celu ułatwienie montażu uszczelnienia, zastosowano dodatkową wargę pyłochronną, zastosowano łopatki na głównej wardze uszczelniającej, zmieniono makrogeometrię wargi uszczelniającej i wiele innych. Wszystkie zmiany konstrukcyjne jak również stosowanie coraz lepszych mieszanek gumy sprawiły, że uszczelnienia tego typu stały się mniej energochłonne i osiągnęły znaczny stopień niezawodności.

Wyciek czynnika smarującego skutkuje niespodziewaną awarią węzłów tarcia, a więc ma istotny wpływ na działanie całej maszyny.

Aktualną sprawą pozostaje wzrost trwałości i niezawodności, ponieważ nieszczelność powoduje wyciek czynnika (oleje przekładniowe, silnikowe i inne) do środowiska a aspekty środowiskowe nabierają w ostatnich latach coraz większego znaczenia. Powszechnie znane fakty są takie, że jedna kropla zużytego oleju silnikowego może zanieczyścić 1000 litrów wody.

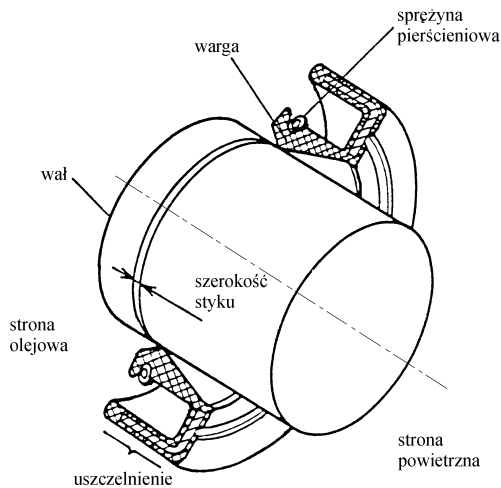
Koszt pojedynczego uszczelnienia nie jest wysoki, lecz jego wymiana ze względu na pracochłonność pociąga za sobą poważne koszty.

1. ZASADA DZIAŁANIA WARGOWEGO USZCZELNIENIA WAŁU

Koncepcja uszczelniania z wykorzystaniem uszczelnienia wargowego jest prosta. Elastyczna wargi wykonana z elastomeru dociskana sprężyną obejmuje stalowy wał i wywiera nacisk na powierzchnię wału działając jak zapora dla oleju i zanieczyszczeń. Klasyczne wykonanie uszczelnienia umożliwia jego zastosowanie w przypadku, gdy różnica ciśnień po obydwu stronach uszczelnienia nie przekracza 30 kPa, jednak istnieją już rozwiązania umożliwiające pracę przy ciśnieniu 25 MPa [1]. Tak ekstremalne warunki pracy ograniczają znacząco trwałość uszczelnienia do kilkunastu godzin.

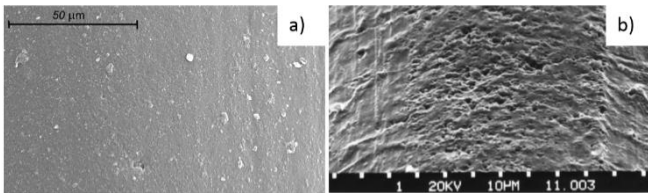
Na Rys. 1 zaznaczono szerokość styku, która w uszczelnieniach produkowanych obecnie wynosi około 0,1 mm. Ze względu na trudne warunki pracy (temperatura oleju często ponad 120°C, nacisk stykowy pod wargą około 1 MPa, prędkość liniowa dochodząca do 25 m/s) straty tarcia w takim uszczelnieniu mogą przewyższać 300 W, co daje obciążenie jednostkowe około $10 \div 12 \text{ W/mm}^2$ powierzchni styku wargi z wałem.

Rozpoznanie tematu pozwala stwierdzić, że od momentu skonstruowania uszczelnień wargowych obniżono straty tarcia ponad pięciokrotnie (z 600 W do około 120 W przy prędkości 5000 obr/min i temperaturze oleju 150°C). Modernizacje uwzględniały zmiany makrogeometrii uszczelnienia a w szczególności kształtu wargi uszczelniającej oraz właściwości elastomeru. Prowadzono również badania nad wpływem właściwości tekstury powierzchni wału na trwałość uszczelnienia, opór tarcia oraz szczelność. Stwierdzono, że wzrost temperatury elastomeru o 10°C dwukrotnie zwiększa prędkość procesów starzenia materiału [2]



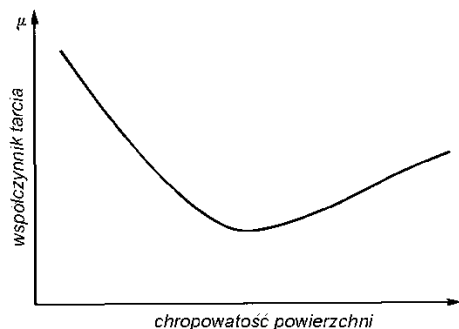
Rys. 1. Klasyczny pierścień uszczelniający wał obrotowy [3]

Istotny jest również stan powierzchni wału, którego zalecany parametr chropowatości powierzchni R_a powinien znajdować się w przedziale $0,25 \div 0,6 \mu\text{m}$. Przez wiele lat panowało błędne przekonanie, że im mniejsza chropowatość powierzchni wału, tym większa szczelność i trwałość uszczelnienia wału, zatem powierzchnie poddawano polerowaniu. Zbyt mała chropowatość powierzchni wału powoduje przyspieszone adhezyjne zużycie wargi gumowej, natomiast zbyt duża chropowatość powoduje zużycie ściernie. Podczas ciernej współpracy dwóch ciał dochodzi z czasem do powstania równowagowej chropowatości. W przypadku pary uszczelnienie-wał chropowatość gumy rośnie natomiast wału - spada. Przedstawia to Rys. 2.



Rys. 2. Powierzchnia wargi uszczelniającej w stanie oryginalnym a) oraz po dotarciu b) [3]

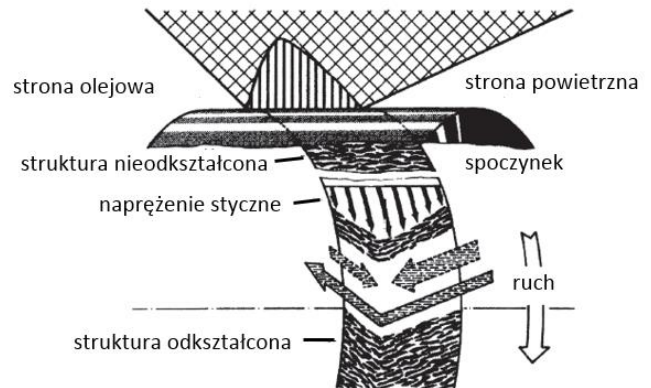
Procesowi rozwijania powierzchni gumy towarzyszy wysokie obciążenie cieplne i znaczne opory ruchu. Niekiedy podczas tego procesu może dojść do przegrzania elastomeru i powstania uszkodzenia. Jedynie rozwinięta powierzchnia wargi uszczelniającej gwarantuje szczelność i wysoką trwałość [4]. Zauważono, że podczas ciernej współpracy dwóch ciał istnieje taka chropowatość przy której opory ruchu są minimalne.



Rys. 3. Zależność współczynnika tarcia od chropowatości powierzchni [5]

Gdyby pod wargą uszczelniającą nie występowała warstwa smarująca doszłoby do bardzo szybkiego zużycia gumy z powodu przegrzania. Prosta analogia do hydrodynamicznej teorii smarowania

może w pewnym zakresie tłumaczyć powstawanie warstwy smarnej ale w żaden sposób nie pozwala wyjaśnić dlaczego olej nie wydostaje się na zewnątrz poza obszar styku wargi z wałem po stronie powietrznej. Prowadzone badania na świecie w kierunku poznania mechanizmu uszczelniania wargowych pierścieni uszczelniających wały obrotowe zaowocowały licznymi teoriami. Jedną z nich jest teoria o pompowaniu wstecznym powstałym na skutek deformacji wierzchołków nierówności gumy [1] – Rys.4.



Rys. 4. Powstawanie przepływu wstecznego pod wargą na skutek deformacji wierzchołków nierówności [1]

Ponieważ kształt wargi tworzy kąt po stronie olejowej równy 45° natomiast po stronie powietrznej 25° rozkład nacisku pod wargą na szerokości styku jest niesymetryczny podczas obrotowego ruchu wału dochodzi do niesymetrycznej deformacji wierzchołków nierówności, jak to schematycznie prezentuje Rys.4. Dzięki asymetrii rozkładu nacisku a więc i deformacji, powstałe obszary mają nierówne pola. Większą szerokość ma obszar pompujący ze strony powietrznej na olejową niż odwrotnie. Makroskopowo powstaje więc przepływ ze strony powietrznej na olejową i nie dochodzi do przecieku czynnika uszczelnianego na stronę powietrzną. Zjawisko to nazywane jest w literaturze pompowaniem wstecznym [10].

W rzeczywistości wiele czynników ma wpływ na występowanie zjawiska uszczelniania w wargowych pierścieniach uszczelniających. Również geometria wału w skali mikro, ślady po obróbce powierzchni decydują o skuteczności procesu uszczelniania [6, 7].

Jakość wykonania i montażu decydująca o współosiowości pierścienia względem wału jak i odchyłek kształtu samego wału to kolejne czynniki decydujące o skuteczności uszczelniania. Według zaleceń maksymalne bicie promieniowe czopa wału współpracującego z uszczelnieniem o średnicy 100 mm nie powinna przekraczać 0,4 mm przy prędkości obrotowej do 3000 obr/min [1].

Ponieważ parametry elastomeru oraz uszczelnianego czynnika ulegają zmianie w czasie eksploatacji na skutek starzenia spowodowanego między innymi temperaturą, nie można zakładać stabilności działania tribosystemu w czasie. Badano wpływ starzenia elastomeru na skutek długotrwałego przechowywania na skuteczność uszczelniania i dowiedziono, że po roku przechowywania w zależności od temperatury przechowywania moment tarcia podczas pracy wzrasta o 30% w stosunku do wyrobu nowego przy przechowywaniu w temperaturze 35°C i o 15% przy temperaturze 15°C [8]. Zjawisko pompowania wstecznego czyli skuteczność uszczelniania spadała przy tym o 40% w pierwszym przypadku i 20% w drugim. Starzenie elastomeru w oleju przebiega w innym tempie i po 100 dniach pompowanie wsteczne spadło o 30% w stosunku do nowego wyrobu [9], natomiast zmierzony spadek wartości momentu tarcia wynosił 10%.

Ponieważ tekstura warstwy wierzchniej wargi uszczelniającej wpływa na opór ruchu, podjęto próbę modyfikacji warstwy wierzchniej wargi w celu obniżenia oporu ruchu bez pogorszenia szczelności.

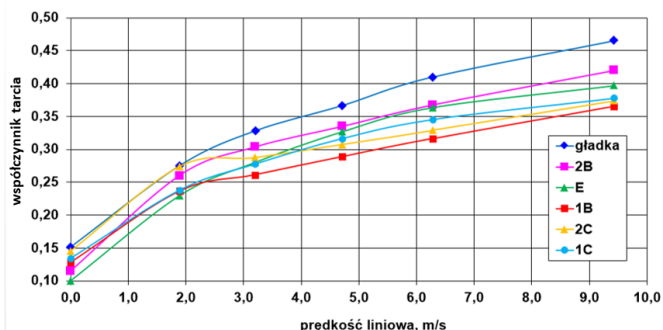
2. PIERŚCIENIE USZCZELNIAJĄCE O ZMNIĘSZONYM OPORZE TARCIA

Wykorzystując teorię rozdziału współczynnika tarcia na sumę składowej adhezyjnej i deformacyjnej, założono że wprowadzenie powierzchniowej porowatości wargi uszczelniającej osłabi zjawisko adhezji jak również zmniejszy siłę potrzebną do stycznego jej odkształcenia, czyli siły niezbędnej do zdeformowania nierówności powierzchni [3]. Tym sposobem zmniejszona wartość współczynnika tarcia jako parametru odpowiedzialnego za moment tarcia uszczelnienia powinno zredukować obciążenia cieplne wargi jak również zmniejszyć straty mocy. Ponieważ opory ruchu i szczelność to dwa podstawowe parametry determinujące przydatność uszczelnienia postanowiono zweryfikować doświadczalnie proponowany kierunek zmian.

2.1. Badania tribologiczne płaskich próbek gumy

W pierwszej kolejności wykonano płaskie próbki gumy z materiału 77A o różniącej się teksturze warstwy wierzchniej charakteryzowanej parametrem chropowatości Ra oraz innymi parametrami. Próbki oznaczono jako 1B, 2B, 1C, 2C i E o wartości parametru Ra odpowiednio: 2,91 μm, 3,59 μm, 2,09 μm, 8 μm, 4,45 μm. Dodatkowo dla porównania przygotowano próbkę oznaczoną jako „gładka” tzn posiadająca chropowatość równą chropowatości standardowej formy do produkcji pierścieni uszczelniających. Badania prowadzono na stanowisku tribologicznym MAN 38.008 w warunkach smarowania olejem silnikowym 15W40 w temperaturze otoczenia. Nacisk pomiędzy badaną próbką i metalową tarczą wynosił 1 MPa, czyli tyle ile pod wargą pierścienia uszczelniającego.

Przebieg zmian wartości współczynnika tarcia w czasie badań przedstawia Rys. 5.



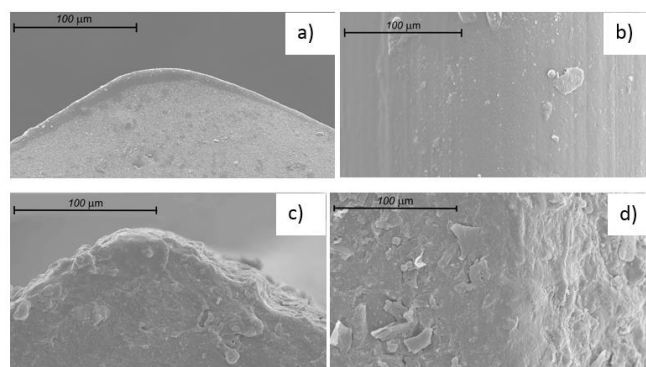
Rys. 5. Przebieg wartości współczynnika tarcia próbek płaskich w warunkach smarowania

Obserwuje się wzrost wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem prędkości liniowej. Wprowadzona modyfikacja powierzchni spowodowała zmniejszenie wartości współczynnika tarcia w stosunku do próbki wyjściowej oznaczonej jako „gładka”. Przy prędkości liniowej równej 9,5 m/s najmniejszą wartość współczynnika tarcia zmierzono w próbce oznaczonej jako 1B. Zmniejszenie wartości w porównaniu do próbki wyjściowej wyniosło 21,5%. Nie zaobserwowano prostej zależności między wartością chropowatości powierzchni a wartością współczynnika tarcia.

2.2. Badania tribologiczne prototypowych pierścieni uszczelniających

Badaniom poddano standardowe pierścienie o rozmiarze 80x105x10 z wargą pyłochronną, oraz bez wargi pyłochronnej, wykonane z mieszanki elastomeru NBR o oznaczeniu 77A. Zgodnie z założeniami wykonana została partia uszczelnień standardowych oraz próbna partia uszczelnień o takim samym wymiarze, z takiej samej

mieszanki gumy, różniąca się teksturą warstwy wierzchniej wargi uszczelniającej. Prototypowa partia uszczelnień modyfikowanych nosi oznaczenie P1. Zdjęcia skaningowe pokazujące profil oraz widok wargi uszczelniającej pierścieni standardowych oraz modyfikowanych wykonane przed badaniami przedstawia (Rys.6).



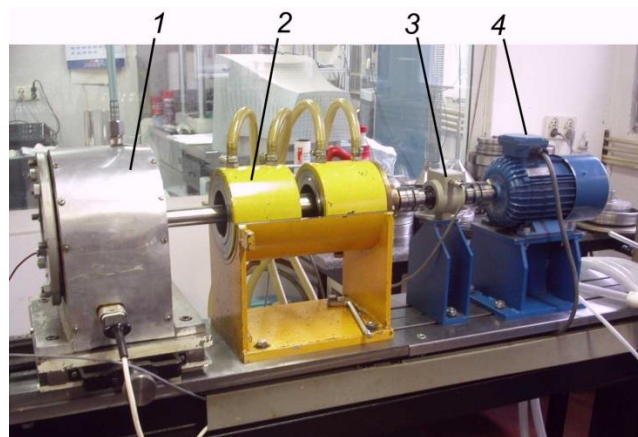
Rys. 6. Zdjęcia skaningowe wargi uszczelniającej przed pracą; a), b) przekrój i widok (pierścień standardowy), c), d) przekrój i widok (pierścień prototypowy)

Wartość parametrów chropowatości powierzchni uszczelnień przedstawia Tabela 1.

Tab. 1. Wartość chropowatości powierzchni wargi uszczelniającej pierścieni standardowych oraz prototypowych (przed pracą)

	Parametry chropowatości powierzchni		
	Ra, μm	Rz, μm	Rt, μm
standardowe	0,52	2,75	4,20
prototypowe	1,97	9,02	22,89

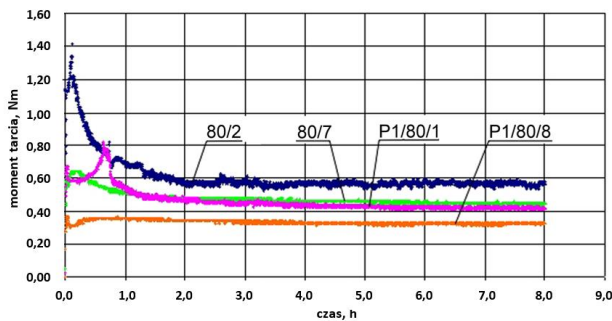
Badania trwałościowe pierścieni uszczelniających prowadzono na stanowisku do badań uszczelnień wałów obrotowych na Politechnice Wrocławskiej w Laboratorium Techniki Uszczelniania i Armatury. Stanowisko jest zautomatyzowane i umożliwia rejestrację przebiegu momentu tarcia w czasie. Badania można prowadzić w temperaturze otoczenia oraz podwyższonej, w warunkach tarcia suchego oraz ze smarowaniem. Widok stanowiska przedstawia Rys. 7. Przed badaniami zmierzono siłę zacisku wargi uszczelniającej na wale, szerokość styku wargi z wałem, chropowatość powierzchni wargi uszczelniającej oraz ciężar uszczelnień.



Rys. 7. Stanowisko do badania uszczelnień wałów obrotowych, 1 – komora badawcza, 2 – łożyska aerostaticzne, 3 – momentomierz, 4 – silnik elektryczny

Na Rys. 8 przedstawiono przebieg wartości momentu tarcia przykładowych uszczelnień z każdej grupy. Wykres przedstawia

zmiany wartości momentu tarcia badanych uszczelnień w czasie 8 godzin pracy ciągłej z prędkością 3000 obr/min w warunkach smarowania olejem silnikowym 15W40 o temperaturze 100 ° C.

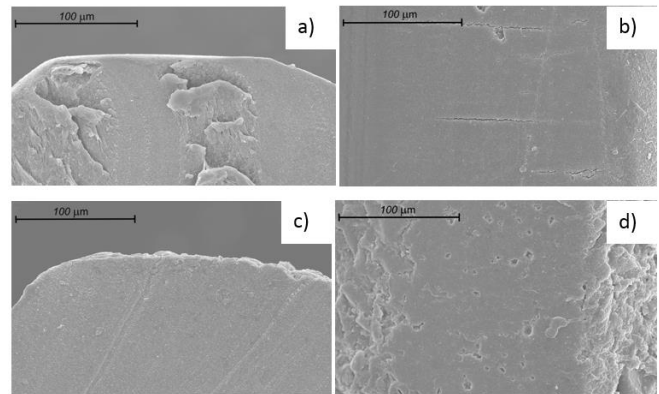


Rys. 8. Przebieg wartości momentu tarcia pierścieni uszczelniających standardowych oraz prototypowych; 80/2 pierścień standardowy z wargą pyłochronną, 80/7 pierścień standardowy bez wargi pyłochronnej, P1/80/1 pierścień prototypowy z wargą pyłochronną, P1/80/8 pierścień prototypowy bez wargi pyłochronnej

Charakterystyczną cechą wszystkich zbadanych pierścieni uszczelniających z wargą pyłochronną był skok wartości momentu tarcia podczas pierwszej godziny pracy, dochodzący w niektórych przypadkach do 1,5 Nm. Zbadano, że przyczyną występowania skoku momentu tarcia jest zbyt wysoki zacisk wargi pyłochronnej na wałku. Wargę pyłochronną nie jest smarowana, więc prawdopodobnie podczas pracy musiało dochodzić do wysokiego obciążenia cieplnego i wstępnego jej zużycia. Zjawisko to było obserwowane również w przypadku pierścieni uszczelniających ze zmodyfikowaną powierzchnią wargi uszczelniającej. Aby ocenić jakościowo i ilościowo wpływ modyfikacji tekstury warstwy wierzchniej wargi uszczelniającej zdecydowano na zbadanie pierścieni uszczelniających bez wargi pyłochronnej. Po kilku godzinach pracy uszczelnienia obserwuje się ustabilizowanie momentu tarcia. Widoczna staje się wtedy różnica momentu tarcia uszczelnień z klasyczną oraz porowatą teksturą wargi uszczelniającej. Rozważając przypadek uszczelnień wyposażonych w wargę pyłochronną, w pierwszej godzinie pracy moment tarcia na skutek wprowadzenia zwiększonej chropowatości powierzchni wargi uszczelniającej jest o około 43 % niższy w stosunku do uszczelnień standardowych. Pod koniec 8-godzinnego testu różnica momentu tarcia sięga około 27 %. W pierścieniach bez wargi pyłochronnej różnica momentu tarcia w pierwszej godzinie pracy wynosi 46 %, natomiast pod koniec testu około 22 %, ponieważ zwiększyła się znacznie szerokość styku wargi z wałem.

Proporcjonalnie do momentu tarcia uszczelnienia zmienia się moc tarcia. Parametr ten pokazuje bezpośrednio korzyści energetyczne płynące z rozważanej modyfikacji pierścieni uszczelniających. Moc tarcia uszczelnień bez wargi pyłochronnej zawierała się w granicach 150 W dla pierścieni standardowych oraz 110 W dla prototypowych. Zastosowanie wargi pyłochronnej zwiększa moc tarcia nawet do 220–300 W.

W celu obserwacji zużycia wargi uszczelniającej po pracy wykonano zdjęcia przy pomocy mikroskopu skaningowego (Rys. 9).



Rys. 9. Zdjęcia skaningowe wargi uszczelniającej po pracy; a), b) przekrój i widok (pierścień standardowy), c), d) przekrój i widok (pierścień prototypowy)

Zdjęcia obszaru styku wargi uszczelniającej z wałem pozwalają na stwierdzenie, że mimo niezbyt długiego czasu badania (8 godzin) daje się zauważyć wyraźne zużycie gumy. Profil wargi jest spłaszczony zarówno w przypadku uszczelnień standardowych jak i modyfikowanych. Na powierzchni wargi uszczelnienia standardowego widoczne są charakterystyczne pęknięcia, prostopadłe do kierunku ruchu wału, świadczące o wysokim obciążeniu cieplnym obszaru styku na skutek silnych oddziaływań adhezyjnych pomiędzy gładkimi powierzchniami. Długość pęknięć jest mniejsza niż szerokość styku wargi z wałem, dlatego uszczelnienie zachowywało szczelność podczas badań. Badania prowadzone były przy użyciu stalowego wałka o chropowatości Ra = 0,2 µm, która mogła sprzyjać zużyciu adhezyjnego. Mimo niekorzystnych warunków współpracy, nie zaobserwowano tego typu uszkodzeń w przypadku wargi o powierzchni prototypowej. Widoczne jest wyraźne wygładzenie nierówności powierzchni, przy czym można zauważyć, że nie doszło do całkowitego starcia nierówności powierzchni. Nie obserwuje się wcześniej zakładanego odbudowywania chropowatej tekstury warstwy wierzchniej, czego przyczyną może być zbyt mała chropowatość powierzchni wału jak również brak cząstek wypełniaczy w gumie.

Po 8 godzinach pracy zmierzono ubytek masy wynikający ze zużycia. Wyniki procentowe przedstawiają się następująco: 0,485% - 80/2, 0,457% - 80/7, 0,415% - P1/80/1, 0,400% - P1/80/8. Najmniejszy procentowy ubytek masy zaobserwowano w przypadku pierścienia uszczelniającego prototypowego bez wargi pyłochronnej.

Na skutek zużycia zmierzona szerokość styku wargi uszczelniającej z wałem wzrosła w stosunku do wartości początkowych. Wyniki procentowe przedstawiają się następująco: 39,9% - 80/2, 38,3% - 80/7, 31,5% - P1/80/1, 20,8% - P1/80/8. Najmniejszy wzrost szerokości styku wargi z wałem świadczący o najmniejszym zużyciu wystąpił również w przypadku uszczelnienia prototypowego bez wargi pyłochronnej. Zużycie elastomeru powoduje zmiany właściwości materiału przejawiające się zmianami siły zacisku wargi uszczelniającej na wale. Niekiedy jest to spadek wartości a niekiedy wzrost. Mierzone w temperaturze 100 ° C wartości prezentują się w następującym porządku: 16,7% - 80/2, 12,5% - 80/7, 11,6% - P1/80/1, 10,6% - P1/80/8. W każdym przypadku zarejestrowano spadek wartości siły, przy czym najmniejszy spadek wystąpił w przypadku uszczelnienia prototypowego bez wargi pyłochronnej.

Prowadzono również badania długodystansowe trwające 200 godzin, które dowiodły, że uszczelnienia prototypowe wykazują prawidłowe parametry nie tylko w początkowym okresie eksploatacji, ale również po dłuższym czasie eksploatacji.

Podczas badania wszystkie pierścienie uszczelniające zachowywały szczelność.

PODSUMOWANIE

Celem prowadzonych badań była weryfikacja możliwości poprawy działania wargowych pierścieni uszczelniających z punktu widzenia ich podstawowych parametrów jak szczelność i moment tarcia. Mimo ponad pół wieku stosowania tego typu uszczelnień i wprowadzenia rozmaitych modernizacji, postępu w zakresie rozwoju nie można uznać za zakończony. Uzyskane wyniki badań zarówno płaskich próbek gumy jak i pierścieni uszczelniających wykazują jednoznacznie, że istotnym parametrem decydującym o trwałości i oporach tarcia jest tekstura warstwy wierzchniej wargi w skali mikro.

Należy podkreślić, że wprowadzone modyfikacje powierzchni płaskich próbek gumy spowodowały zmniejszenie wartości współczynnika tarcia o maksymalnie 21,5%. Podobnie w przypadku uszczelnień zaobserwowano zmniejszenie wartości momentu tarcia o 46% w pierwszej godzinie pracy, czyli w czasie gdy występuje największe obciążenie cieplne wargi i ryzyko uszkodzenia elastomeru jest bardzo wysokie. Po 8 godzinach pracy uszczelnienia prototypowe charakteryzowały się mniejszym o około 22% oporem ruchu w stosunku do uszczelnień standardowych.

Ubytek masy – najmniejszy w przypadku uszczelnień prototypowych świadczy o najmniejszej intensywności procesu zużywania. Z kolei najmniejszy spadek wartości siły zacisku wargi na wale świadczy o najmniejszym obciążeniu cieplnym wargi, co przekłada się na najwolniej przebiegający proces starzenia gumy i niekorzystnej zmiany parametrów.

Straty mocy na pokonanie sił tarcia wynosiły 150W w przypadku uszczelnień standardowych oraz około 110W w przypadku prototypowych. Należy podkreślić że jest to moc która w większości ulega przemianie na ciepło, które powoduje duże obciążenie cieplne wargi ze względu na słabą przewodność cieplną gumy. Wprowadzona modyfikacja umożliwiła zmniejszenie strat mocy o ponad 26%.

Wał z którym współpracowały uszczelnienia posiadał dość niską chropowatość powierzchni – z dolnego zakresu zalecanego przedziału. Należy również podkreślić, że materiał z którego wykonano uszczelnienia jest najbardziej powszechnym, najtańszym i jednocześnie nienajlepszym pod kątem trwałości i wytrzymałości termicznej materiałem. Dlatego uzyskane rezultaty należy uznać za satysfakcjonujące. Rozszerzenie liczby istotnych parametrów o inne materiały oraz chropowatości układu wargi-wał umożliwią zoptymalizowanie konstrukcji.

BIBLIOGRAFIA

1. Flitney R. *SEALS AND SEALING HANDBOOK*, 6th Edition, Elsevier, 2014.
2. Gawliński M., *Lokalne warunki styku a opory tarcia elastomerowych wargowych pierścieni uszczelniających*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
3. Romanik G., *Elastomerowe uszczelnienia wargowe ze zmodyfikowaną teksturą warstwy wierzchniej wargi uszczelniającej*, Rozprawa doktorska, Wrocław, 2009
4. Horve L., *The correlation of rotary shaft radial lip seal service reliability and pumping ability to wear track roughness and micro-asperity formation*, SAE International Congress and Exposition, Detroit, 1991
5. Lawrowski Z., *Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie*, WNT, Warszawa, 1993
6. Jia X, Jung S., Haas W., Salant R.,F., *Numerical simulation and experimental study of shaft pumping by plunge ground shafts with rotary lip seals*, Tribology International, 48 (2012) pp. 155–161
7. Kunstfeld T, Haas W., *Shaft surface manufacturing methods for rotary shaft seals*. Sealing Technology 2005; July: pp. 5–9
8. Guo F., Jia X., Huang L., Salant R.,F., Wang Y., *The effect of aging during storage on the performance of a radial lip seal*, Polymer Degradation and Stability, 98 (2013) pp.2193-2200
9. Guo F., Jia X., Lv M, Wang L., Salant R.,F., Wang Y., *The effect of aging in oil on the performance of a radial lip seal*, Tribology International 78 (2014) pp.187–194
10. Baart P., Lugt, P. M., Prakash, B., *Review of the lubrication, sealing, and pumping mechanisms in oil- and grease-lubricated radial lip seals*, PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART J-JOURNAL OF ENGINEERING TRIBOLOGY, Volume: 223, Issue: J3, Pages: 347-358, MAY 2009.

Crankshaft seals with reduced frictional resistance

The article discusses the cooperation of the elastomeric sealing ring with the shaft in terms of wear and losses to overcome friction forces, the construction of a classic seal and a seal with reduced resistance to movement. Because the lip-shaft system is a specific friction pair, the focus has been on local micro contact conditions as a parameter that determines global motion resistances on a macro scale. Since the occurrence of premature sealing failure in spite of small costs of the element itself generates serious costs of repair and downtime of the transport fleet, the problem of durability and reliability of the described type of seals remains valid.

Autorzy:

dr inż. **Grzegorz Romanik** – Politechnika Wroclawska Zakład Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych, adres e-mail: grzegorz.romanik@pwr.edu.pl

dr inż. **Janusz Rogula** – Politechnika Wroclawska Zakład Podstaw Konstrukcji i Maszyn Przepływowych, adres e-mail: janusz.rogula@pwr.edu.pl

JEL: L62 DOI: 10.24136/atest.2018.157

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15