

Paweł Śliwiński, dr inż.

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny

e-mail: psliwin@mech.pg.gda.pl

Wyniki badań trwałościowych uszczelnień wału silnika hydraulicznego **The results of durability tests of the hydraulic motor shaft seals**

W artykule przedstawiono wyniki badań różnych uszczelzek wału ukierunkowane na wybór uszczelki o największej trwałości przy pracy pod ciśnieniem cieczy 2 MPa i z prędkością poślizgu min 2 m/s. Cieczą roboczą jest woda – ciecz o najgorszych właściwościach smarnych. W artykule opisano również oryginalny przyrząd, który pozwolił na pomiar wszystkich parametrów węzła uszczelniającego.

The paper presents the test results of various shaft seals directed to choose the seals distinguished with the highest durability at a pressure of 2 MPa, when sliding speed amounts to minimum of 2 m/s. The working liquid is water – the medium with the worst lubricating properties. In article also described the original apparatus that allows measurement of all parameters in the node seal.

Słowa kluczowe: uszczelka, czop, powłoka, silnik hydrauliczny, przyrząd

Keywords: seal, pin, shell, hydraulic motor, instrument

1. Wstęp

Jednym z istotnych problemów w hydraulicznych maszynach wyporowych jest niska trwałość węzłów uszczelniających, a szczególnie uszczelnień wałów. Problem ten potęguje się zwłaszcza w silnikach satelitowych, gdzie w komorze wału występuje wysokie ciśnienie (nawet 2 MPa), wysoka prędkość obrotowa wału (do 2000 obr/min) a ciecz charakteryzuje się słabymi właściwościami smarnymi.

Duże prędkości poślizgu uszczelki o czop wału (powyżej 2m/s), duże ciśnienie w dławnicy i słabe właściwości smarne cieczy (zwłaszcza wody i stosowanej w górnictwie emulsji HFA-E o stężeniu poniżej 1%) oraz nieodpowiednie wykonanie powierzchni czopa wału powodują duże straty energetyczne w węźle uszczelniającym, wysoką temperaturę węzła i tym samym przyspieszone zużycie uszczelnienia.

Celem badań było wytypowanie charakteryzującego się największą trwałością skojarzenia materiału wysokociśnieniowego uszczelnienia wału obrotowego i materiału czopa wału dla przypadku smarowania wodą – czynnika roboczego o najgorszych właściwościach smarnych.

W celu przeprowadzenia badań zaprojektowano i wykonano oryginalny przyrząd umożliwiający pomiary wszystkich parametrów węzła uszczelniającego.

2. Parametry badań

Producenci większości uszczelnień wałów obrotowych zalecają nie przekraczanie 1 m/s podczas pracy ciągłej przy ciśnieniu w dławnicy znacznie niższym niż 2 MPa. W rzeczywistych warunkach pracy silnika przekroczone zalecane wartości prędkości poślizgu dwukrotnie; przekroczone również podaną wartość ciśnienia. Zatem, badania trwałościowe, przeprowadzono przy takich parametrach jakie występują w rzeczywistych warunkach pracy silników satelitowych, tj:

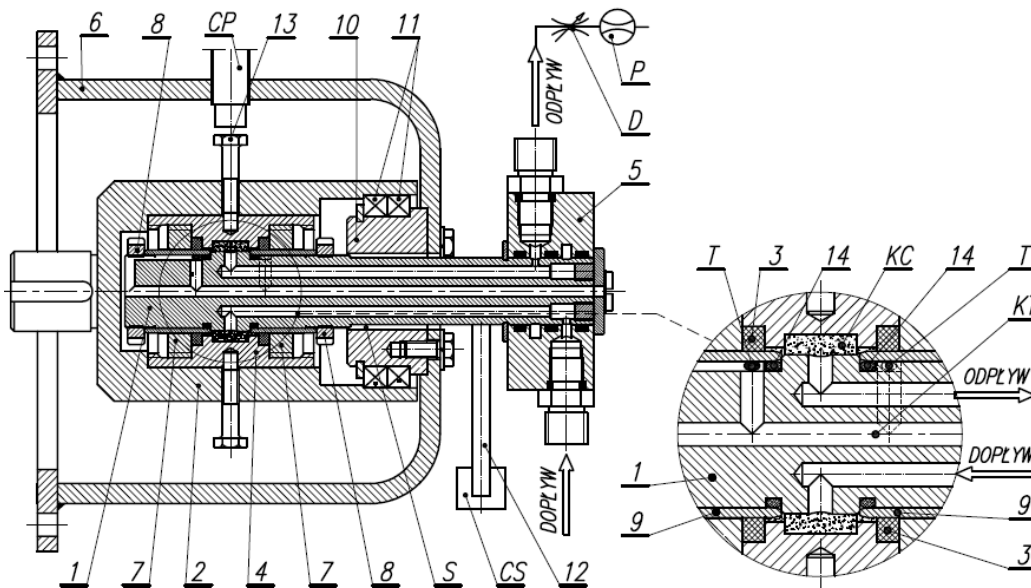
- ciśnienie w dławnicy: 2 MPa. Wyjątkiem było skojarzenie R-NBC, dla którego po 24 godzinach testu podniesiono ciśnienie aż do 6 MPa (tabela 1);
- prędkość obrotowa wału 1528 obr/min (prędkość liniowa 2 m/s).

W programie badań trwałościowych przyjęto cykl przerywany, tj. badania nie były przeprowadzane w sposób ciągły, tylko przerywane na jedną godzinę po każdych trzech godzinach pracy w celu symulowania prawdziwych warunków pracy uszczelnienia. Badania trwałościowe prowadzone były do momentu wystąpienia wycieku z uszczelnienia.

3. Przyrząd do badania uszczelnień w ruchu obrotowym

Budowę przyrządu przedstawiono na rys. 1. Charakterystyczną cechą przyrządu jest to, że badane są dwa uszczelnienia, które współpracują z odpowiednimi czopami wału. Rolę czopów wału pełnią tu

tulejki o grubości 1 mm (poz. 9 na rys. 1). Para jednakowych uszczelnień i tulejek uszczelnia komorę KC wypełnioną cieczą pod ciśnieniem.



Rys. 1. Przyrząd do badania uszczelnień wału pompy i silnika satelitowego: 1 – wał; 2 – gniazdo uszczeltek; 3 – badane uszczelnienie; 4 – głowica; 5 – gniazdo przyłączy; 6 – korpus; 7,8 – nakrętka; 9 – wymienne tulejki wykonane z różnych materiałów; 10 – tuleja; 11 – łożyska; 12 – dźwignia siłomierza; 13 – śruba; 14 – O-Ring; pozostałe oznaczenia opisane w tekście [3].

Przyrząd umożliwia badanie uszczelnień o średnicy wewnętrznej równej 25mm i pomiar następujących wartości:

- prędkości obrotowej czujnikiem CP;
- temperatury w obrębie powierzchni styku uszczelnienia i wału termoparami T;
- momentu tarcia generowanego przez uszczelnienie za pośrednictwem czujnika siły CS osadzonego na ramieniu 12;
- temperatury cieczy smarującej;
- ciśnienia w dławnicy za pomocą czujnika ciśnienia wpiętego w gałęzi dopływu lub odpływu cieczy. Żądaną wartość ciśnienia w komorze KC ustawia się dławikiem D;
- natężenie przepływu cieczy smarującej przepływomierzem P;
- wartości przecieku czynnika z uszczelnień do kanału termopar KT.

Wyżej wymienione mierzone parametry dotyczą dwóch uszczeltek z dwiema tulejkami.

4. Charakterystyka uszczeltek oraz tulejek wytypowanych do badań

Do badań wytypowano następujące uszczelnienia:

a) R9 PTFE4/NBR wykonane z KEFLOY 22 (mieszanka PTFE, grafitu i koksu), charakteryzujące się następującymi parametrami (wg producenta) [4]:

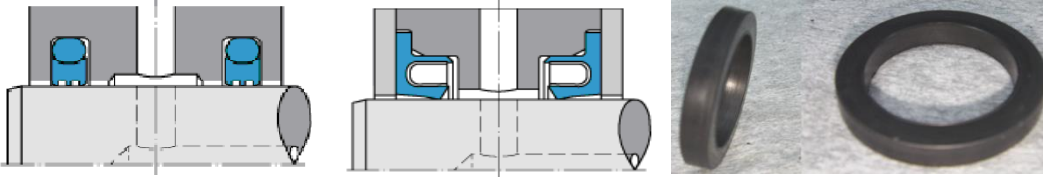
- ciśnienie robocze do 400 bar;
- temperatura pracy od -40°C do $+180^{\circ}\text{C}$ (zależna od materiału pierścienia typu O);
- prędkość liniowa: ciągła do 1 m/s, chwilowa do 5 m/s;
- medium robocze: można je stosować do prawie wszystkich mediów;

b) MUPU – charakteryzujące się następującymi parametrami (wg producenta) [4]:

- ciśnienie do 150 bar w zastosowaniach dynamicznych, do 200 bar w zastosowaniach statycznych;
- temperatura od -100°C do $+260^{\circ}\text{C}$;
- prędkość liniowa w ruchu obrotowym do 2 m/s.
- media: praktycznie wszystkie ciecze, chemikalia i gazy.

c) typu U z rozchyloną wargą – dostarczone przez producenta silników satelitowych – firmę Stosowanie Maszyn z Katowic. Składa się z profilu w kształcie litery U wykonanego z PTFE (75%

składu) połączonego z grafitem (25% składu) oraz metalowej sprężyny typu meander wywołującej napięcie wstępne między uszczelnieniem a czopem wału.



Rys. 2. Uszczelki: od lewej: R9, MUPU i typu U z rozchyloną wargą.

Do badań uszczelnień w ruchu obrotowym wykonano tulejki z następujących materiałów:

- stal narzędziowa NIMAX w stanie surowym, ($R_a=0,10$), twardość 40HRC;
- stal narzędziowa NIMAX w stanie surowym z naniesioną powłoką Balinit C, ($R_a=0,13$). Powłoka Balinit C jest powłoką niskotarciową wykonaną na bazie amorficznego węgla z dodatkiem wolframu (oznaczenie materiału powłoki: WC/C (a-C:H:W)) o mikrotwardości 1500HV [5];
- stal narzędziowa NIMAX w stanie surowym, z powłoką chromu technicznego o mikrotwardości 62 HRC i o chropowatości $R_a=0,16$;
- stal narzędziowa NIMAX w stanie surowym, poddana azotonasiarczaniu, mikrotwardość powierzchni 55 HRC, chropowatość $R_a=0,14$;
- stal 40H ulepszona cieplnie o twardości 56 HRC, chropowatość $R_a=0,08$.

Skojarzenia uszczelki z tulejką oznaczono następującymi symbolami:

- R–NG – uszczelka R9 i tulejka wykonana z NIMAX’u bez dodatkowej obróbki,
- R–NH – uszczelka R9 i tulejka z NIMAX’u z powłoką chromu technicznego;
- R–NBC – uszczelka R9 i tulejka z NIMAX’u z powłoką BALINIT’u C;
- R–NA – uszczelka R9 i tulejka z NIMAX’u azotonasiarczana;
- R–40H – uszczelka R i tulejka ze stali 40H ulepszonej cieplnie.

Pozostałe oznaczenia należy rozumieć podobnie. Litera M w oznaczeniu to uszczelka MUPU zaś litera U to uszczelka typu U.

5. Wyniki badań

Wyniki badań laboratoryjnych wykazały, że moment tarcia w węźle uszczelnianym, moc tarcia i temperatura w styku uszczelki z powierzchnią, zależą od chropowatości powierzchni czopa tulejki. Zastosowanie tulejek o niższej chropowatości przyniosło efekt w postaci znacznie mniejszych mocy traconych na tarcie w zakresie wyższych prędkości poślizgu. Podobne wyniki uzyskiwane były także przy niższych wartościach ciśnień.

Ponadto wyniki badań dowiodły, że przy ciśnieniu $p=2\text{MPa}$ w komorze uszczelki [2]:

- najmniejszy moment rozruchowy (min 0,5 Nm), moment tarcia (0,2Nm) oraz moc tracona występuje w uszczelnieniach MUPU;
- najniższą temperaturę (37°C) stwierdzono w styku uszczelnienie R9 współpracujące z tulejką z powłoką Balinit C;
- największy moment tarcia (nawet 2,6Nm) występował w parze uszczelki U z każdą tulejką
- najwyższa temperatura występowała w parze każdej uszczelki z tulejką pokrytą powłoką chromu technicznego (nawet 100°C).

Trwałość uszczelnienia zależy od momentu tarcia w węźle, innymi słowy zależy od konstrukcji samej uszczelki, materiału czopa wału oraz stanu jego powierzchni – zwłaszcza chropowatości. Badania wykazały, że niska chropowatość sprzyja osiągnięciu niższego współczynnika tarcia. Wyjątkiem była uszczelka R9 z tulejkami ze stali 40H o chropowatości $R_a=0,08$, której trwałość była dwudziestosiedmiokrotnie mniejsza od trwałości skojarzenia uszczelki R9 z tulejkami ze stali NIMAX pokrytymi powłoką Balinit C o chropowatości $R_a=0,13$. Dodatkowym ważnym parametrem jest prędkość obrotowa czopa. Moment tarcia i prędkość obrotowa wału decydują o mocy traconej w węźle a tym samym wpływają na temperaturę pracy węzła i jego trwałość.

Wyniki badań trwałościowych wraz z parametrami, przy których je przeprowadzono, podano w tabeli 1. Natomiast w tabeli 2 przedstawiono zdjęcia tulejek i uszczelnień tworzących dane

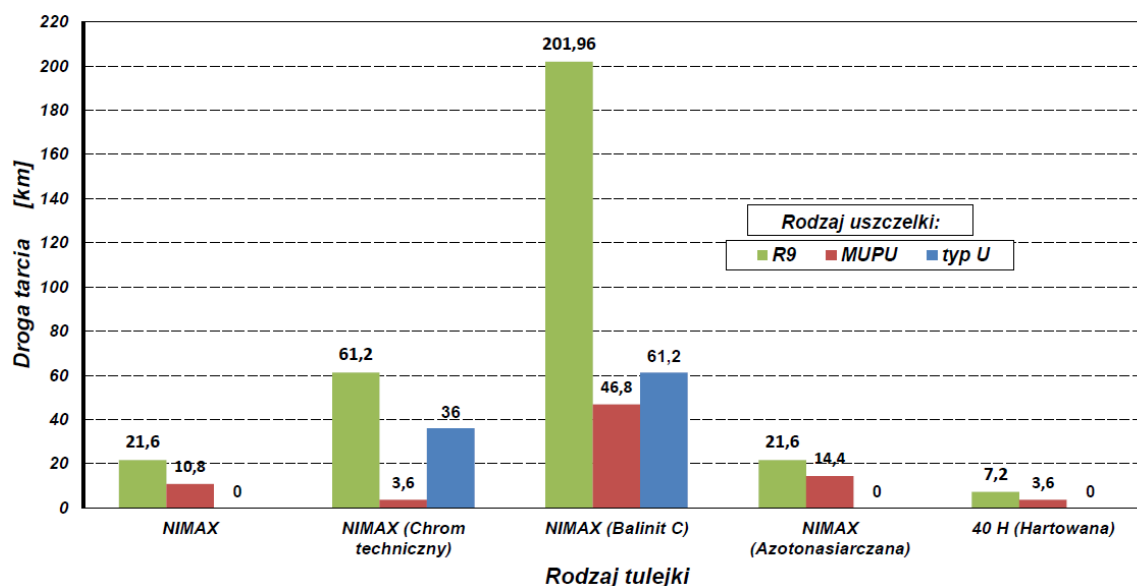
skojarzenia. Na zdjęciach tych widać ślady zużycia powierzchni tulejki przez uszczelnienie oraz materiał uszczelnienia pokrywający powierzchnię tulejek. Jednak nie wszystkie uszczelnienia „przywierały” do powierzchni tulejek. Najkorzystniej wypada tutaj tulejka z powłoką Balinit C, dla której nie zaobserwowano materiału uszczelki „przyklejonego” do tulejki w miejscu ich styku.

W trakcie badań żadna z tulejek nie uległa zużyciu.

Tabela 1. Wyniki badań trwałościowych [1]


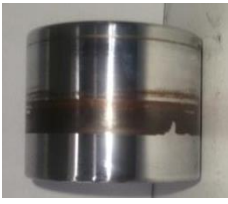

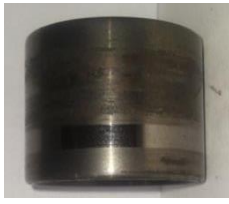










L.p.	Ciśnienie	Prędkość poślizgu	Rodzaj skojarzenia	Ilość przerywanych cykli pracy	Przyklejony materiał uszczelki na tulejce ?		Okresowe wzrosty momentu tarcia i temp?		Czas pracy [h]	Droga tarcia [km]
	[MPa]	[m/s]			TAK	NIE	TAK	NIE		
1	2	2	R-NG	1	✓		✓		3	21,6
2	2	2	R-NH	3	✓			✓	8,5	61,2
3	2/4/6	2/2,6/2,9	R-NBC	8/1/1		✓		✓	24/2/1	202
4	2	2	R-NA	1	✓		✓		3	21,6
5	2	2	R-40H	–		✓		✓	1	7,2
6	2	2	M-NG	–	✓			✓	1,5	10,8
7	2	2	M-NH	–	✓			✓	0,5	3,6
8	2	2	M-NBC	3		✓		✓	6,5	46,8
9	2	2	M-NA	–	✓		✓		2	14,4
10	2	2	M-40H	–		✓		✓	0,5	3,6
11	–	–	U-NG	–	–	–	–	–	–	–
12	2	2	U-NH	2	✓			✓	5	36
13	2	2	U-NBC	3		✓		✓	8,5	61,2
14	–	–	U-NA	–	–	–	–	–	–	–
15	–	–	U-40H	–	–	–	–	–	–	–

Przy założonych wyżej parametrach badań trwałościowych (tj. 2 MPa i 2m/s) skojarzenie R-NBC pracowało w sumie 24 godziny (przebyta droga tarcia to 172,8 km) i nie zaobserwowano wycieku z uszczelnienia. W związku z tym ciśnienie zostało podniesione do 4 MPa a prędkość obrotowa wału do 2,6 m/s (2000 obr/min). W tych warunkach uszczelki pracowały 2 godziny (przebyta droga tarcia to 18,72 km). Następnie podniesiono ciśnienie do 6 MPa a prędkość do 2,9 m/s (2200 obr/min). Wyciek nastąpił po jednej godzinie współpracy uszczelnienia z materiałem tulejki (przebyta droga tarcia 10,44 km). W sumie droga tarcia skojarzenia R-NBC wyniosła prawie 202 km. Na rys. 3 przedstawiono zbiorcze wyniki wszystkich badań trwałościowych wytypowanych skojarzeń uszczelki-tulejki.



Rys. 3. Droga tarcia (w km) skojarzeń uszczelka-tulejka przy ciśnieniu 2MPa i prędkości poślizgu 2 m/s [1].

Tabela 2. Wygląd wybranych tulejek i uszczeltek po badaniach trwałościowych [1]

R-NH		R-NBC	
			
M-NH		M-NBC	
			
M-NA		U-NH	
			
U-NBC			
			

Analiza wyników badań uszczelnień jednoznacznie wskazuje, że o trwałości wysokociśnieniowego węzła uszczelniającego wału obrotowego decyduje:

- **w pierwszej kolejności rodzaj uszczelki.** W badaniach okazało się, że uszczelka R9 wykazywała najwyższą trwałość w dowolnym skojarzeniu z wytypowanymi materiałami tulejek;
- **w drugiej kolejności stan warstwy wierzchniej czopa wału** (rodzaj materiału, rodzaj zastosowanej obróbki cieplno-chemicznej i rodzaj powłoki). Niezależnie od rodzaju uszczelki największy przebieg drogi tarcia zapewniały tulejki ze stali narzędziowej NIMAX pokryte niskotarciową powłoką Balinit C. Tuleje te zapewniały także najniższą temperaturę obszaru styku, wynikającą z niskiego momentu tarcia, zwłaszcza przy prędkości obrotowej wału nie przekraczającej 2 m/s.
- **w trzeciej kolejności stan powierzchni czopa wału**, czyli jego twardość i chropowatość. Zaleca się aby chropowatość czopa wału w miejscu osadzenia uszczelnień wynosiła $Ra=0,10-0,16$. Większa chropowatość jest przyczyną wzrostu momentu tarcia w węźle tarcia i tym samym może negatywnie wpłynąć na trwałość.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania eksperymentalne dowiodły, że należy stosować uszczelnienie typu R9 do uszczelniania wałów pomp i silników satelitowych zasilanych wodą. Uszczelniana powierzchnia czopa wału powinna charakteryzować się niską chropowatością – najlepiej $Ra=0,1$. Zaleca się również pokrywanie czopa wału niskotarciową powłoką BalinitC. Powłoka ta wymaga jednak podłoża o dużej twardości – powyżej 40 HRC. Wykonywanie całego wału np. ze stali narzędziowych może się okazać ekonomicznie nieopłacalne. W związku z tym do badań laboratoryjnych wykonano silnik, w którym na czopy wału wklejono specjalne tulejki wykonane z NIMAX'u i pokryte powłoką BalinitC.

Badania uszczelnień wykonano w ramach projektu badawczego LIDER/35/102/L-2/10/NCBiR/2011 „Nowe opracowanie hydraulicznych maszyn satelitowych do napędów z cieczami ekologicznymi oraz z cieczami niepalnymi”, finansowanego przez NCBiR.

LITERATURA

- [1] Chmiel P.: „*Badania wysokociśnieniowych uszczelnień wału hydraulicznych silników satelitowych*”. Praca dyplomowa. Promotor: dr inż. P. Śliwiński. Politechnika Gdańska, 2012r.
- [2] Łoś K., Maciejewski M., Lipski A.: „*Projekt przyrzędu oraz badania uszczelnień wału i wirnika satelitowych maszyn waporowych*”. Praca dyplomowa. Promotor: dr inż. P. Śliwiński. Politechnika Gdańska, 2012r.
- [3] Śliwiński P., Łoś K., Maciejewski M., Lipski A.: „Sposób doboru uszczelnień do wału obrotowego zwłaszcza uszczeltek oraz urządzenie do realizacji tego sposobu”. Zgłoszenie patentowe nr P.400495 z dnia 24.08.12r.
- [4] Katalog O.L. Systemy uszczelniające. www.test.pl.
- [5] Katalog powłok Oerlikon Balzers. <http://coating-guide.balzers.com/web/en/application/cutting/coating-summary/C>