

WOJCIECH OKULARCZYK

Politechnika Częstochowska

Katedra Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych i Zarządzania Produkcją

Al. Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa

e-mail: okularczyk@poczta.onet.pl

Wykorzystanie analizy wielokryterialnej do wyboru uszczelnień z tworzyw polimerowych stosowanych w hydraulice wodnej^{*)}

Streszczenie — Przedmiotem badań był wybór — metodą optymalizacji wielokryterialnej — uszczelnień polimerowych przeznaczonych do hydraulicznych układów wodnych. Kryteriami wyboru były przy tym czynniki techniczne (przede wszystkim trwałość i szczelność), ekonomiczne (energia tracona wskutek tarcia) oraz ekologiczne (ekowskaźnik 99). Po wstępnej kwalifikacji, do badań wytypowano dwa typy uszczelnień („Mupuseal”) wykonanych z PE-UHMW. Wyniki zastosowanej metody świadczą o tym, że szczelność i trwałość tych typów uszczelnień nie idą ze sobą w parze, czyli większej szczelności towarzyszy mniejsza trwałość i odwrotnie. Taka prawidłowość jest konsekwencją występowania dwóch typów zużycia uszczelnień: zmęczeniowego (pogarszającego szczelność) oraz ściernego (pogarszającego trwałość). Dobór uszczelnień do konkretnego zastosowania powinien uwzględniać tę właśnie zależność.

Słowa kluczowe: hydraulika wodna, uszczelnienia polimerowe, optymalizacja wielokryterialna, trwałość, szczelność.

APPLICATION OF MULTICRITERIAL ANALYSIS FOR SELECTION OF POLYMERIC SEALS IN HYDRAULICS

Summary — The choice of polymeric seals for water hydraulic systems was the subject of investigations by multicriterial optimization. The criteria of choice were technical factors (mainly durability and tightness, see Fig. 4 and 5), economical ones (energy lost as a result of friction, see Fig. 6 and 7) as well as ecological one (ecoindex 99). After preliminary selection, two types of seals made of PE-UHMW (“Mupuseal”) were chosen. The results obtained show that durability does not follow tightness — the higher tightness the lower durability, and inversely. This regularity is a consequence of two types of seal wear: fatigue one (deteriorating the tightness) and abrasive one (deteriorating the durability). The selection of seals for the given application should take this dependence into consideration.

Key words: water hydraulic, polymeric seals, multicriterial optimization, durability, tightness.

Hydraulika siłowa wykorzystuje prostą zamianę energii przenoszonej przez sprężoną ciećz hydrauliczną na ruch posuwisto-zwrotny; otrzymuje się przy tym dużą siłę, zachowując jednocześnie dobrą sprawność elementów wykonawczych. Z tej właśnie przyczyny znajduje ona zastosowanie we wszystkich dziedzinach przemysłu. Towarzyszące procesom przemysłowym częste wycieki ciećzy hydraulicznych (w skład których wchodzi głównie oleje mineralne i poliglikole), wpływające na degradację środowiska naturalnego, skłoniły konstruktorów do podjęcia poszukiwań nowych rozwiązań technicznych zapobiegających temu zjawisku.

Znaczenia nabrało więc opracowanie przyjaznego środowisku naturalnemu medium roboczego układów hydraulicznych oraz zastosowanie skutecznych układów uszczelniających.

Zalety wody jako ciećzy roboczej w układach hydraulicznych to m.in. ekologiczność, niepalność i niska cena. Ponadto woda, w porównaniu z olejem mineralnym, odznacza się kilkakrotnie większym współczynnikiem przewodzenia ciepła a także mniejszą lepkością powodującą mniejsze straty ciśnienia (wynikające z oporów przepływu) oraz mniejsze grzanie się wody [1]. Współczynnik ściśliwości wody, dwukrotnie przekraczający współczynnik ściśliwości oleju mineralnego, pozwala również na uzyskanie lepszego efektu w pozycjonowaniu i podatności na sterowanie robotów przemysłowych wyposażonych w układ hydrauliczny napełniony wodą. Dzięki dużej wartości przewodnictwa ciep-

^{*)} Artykuł zawiera materiał przedstawiony w ramach X Jubileuszowych Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo Tworzyw Polimerowych”, Lublin—Kazimierz Dolny, 12—15 czerwca 2005 r.

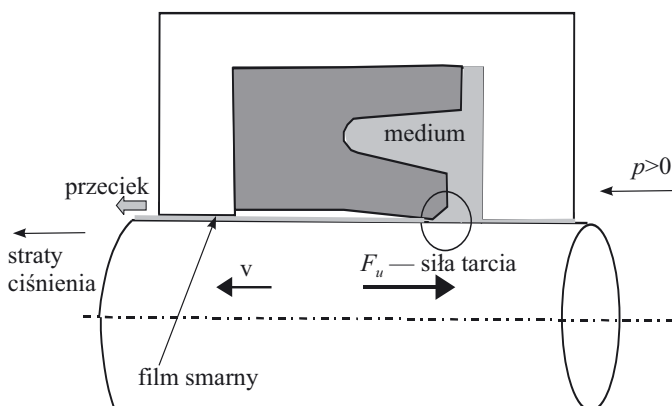
Innego wody, która jest ok. 4—5 razy większa od wartości przewodnictwa oleju mineralnego, w wielu wypadkach można zrezygnować ze stosowania chłodziw w takich układach. Praktycznie rzecz biorąc, w układach wodnych nie występuje także zjawisko zapowietrzania, będące dużym problemem w razie stosowania oleju.

Niestety, mała lepkość wody może być również jej wadą, albowiem w warunkach mniejszej grubości filmu smarnego, nierozdzielającego skutecznie współpracujących elementów, dochodzi do dużego tarcia, powodującego znaczne zużywanie się takich elementów, w tym także uszczelnień.

Polimery stosowane w uszczelnieniach wodnych układów hydraulicznych muszą charakteryzować się możliwością pracy na sucho oraz odpornością na ścieranie. Ponadto ich moduły sprężystości poprzecznej oraz twardości powinny przybierać wartości umożliwiające zamknięcie uszczelnianej szczeliny elementu hydraulicznego i dokładne dopasowanie się uszczelnienia do powierzchni roboczych zabudowy [2, 3].

Stawiane warunki spełnia politetrafluoroetylen (PTFE) — polimer najpowszechniej stosowany do wytwarzania uszczelnień. Ponieważ PTFE charakteryzuje się dużą wartością peźzania, do polimeru dodaje się napelniacz przeciwdziałający temu zjawisku. Najodpowiedniejsze do pracy w wodnych układach hydraulicznych są napelniacze węglowe — koks (do 35 % cz. mas.), grafit (do 15 % cz. mas.) [4, 5] oraz włókna węglowe (CF, ok. 10—20 % cz. mas) [6]; ich zastosowanie pozwala na większe obciążenie dynamiczne układu oraz lepsze odprowadzanie z niego ciepła.

Polecanym materiałem polimerowym [7, 8] do zastosowań na uszczelnienia ruchowe w wodnych układach hydraulicznych jest również polietylen o bardzo dużym ciężarze cząsteczkowym (PE-UHMW, *ultra high molecular weight polyethylene*). Zużycie tribologiczne PE-UHMW w wodzie bądź w płynie fizjologicznym jest znacznie mniejsze niż w środowisku suchym [9, 10], a także wielokrotnie mniejsze niż np. czystego PTFE [11].



Rys. 1. Zasada działania tłoczkowej uszczelki typu U (wargowej) w warunkach ciśnienia p

Fig. 1. Principle of operation of the piston rod seal (U type) under pressure

W 2001 r. na rynku handlowym pojawił się nowy materiał polimerowy — termoplastyczny poliuretan z dodatkami samosmarnymi „S-Ecopur” [12] — przeznaczony na uszczelki w wodnych cylindrach hydraulicznych. Uszczelnienia z niego wykonuje się z półfabrykatów — prętów i tulei. Z wymienionych wyżej polimerów uszczelki wytwarza się metodą obróbki skrawaniem [13].

Zasadę działania wargowej uszczelki tłoczkowej (typu U) w warunkach ciśnienia $p > 0$ przedstawia rys. 1 [13].

ZAŁOŻENIA PRACY

Celem badań było dokonanie metodą optymalizacji wielokryterialnej wyboru uszczelnień wykonanych z tworzyw polimerowych przeznaczonych do wodnych układów hydraulicznych. Zadaniem każdej analizy optymalizacyjnej danego obiektu technicznego jest poprawa efektywności jego pracy lub wybór elementu optymalnego, tzn. tego, który jest zgodny z przyjętymi w analizie kryteriami.

W przedstawionej pracy kryteria wyboru stanowiły: czynniki techniczne (siła tarcia, trwałość, szczelność), ekonomiczne (wartość energii traconej wskutek tarcia, koszt uszczelnienia) i ekologiczne (za miarę niekorzystnego działania na środowisko przyjmuje się wartość tzw. ekowskaźnika 99 obliczanego przy użyciu programu komputerowego). W procesie optymalizacji wielokryterialnej posłużono się uogólnionym parametrem optymalizacji, czyli uogólnioną funkcją celu D [14]. Jest ona średnią geometryczną funkcji cząstkowych celu d_i [15, 16] określających poszczególne kryteria wyboru (równanie 1).

$$D = \sqrt[k]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \dots d_k} \quad (1)$$

Funkcje cząstkowe celu d_i odpowiadają parametrom y_i , będącym miarą poszczególnych kryteriów wyboru. Uogólniona funkcja celu D jest związana z kilkoma parametrami wyrażonymi w różnych jednostkach miary, dlatego też określając D należy zrezygnować z naturalnej miary każdego z parametrów i posłużyć się umowną skalą jakości, przybierającą wartości bezwymiarowe w przedziale 0—1. Ogólnie przyjęta skala jakości obejmuje następujące poziomy [17]:

- bardzo dobrze — 1,00—0,80,
- dobrze — 0,80—0,63,
- zadowalająco — 0,63—0,37,
- źle — 0,37—0,20,
- bardzo źle — 0,20—0,00.

Wartość $d_i = 0,00$ odpowiada wartości odpowiedzi $D = 0$ (czyli takiej, która jest nie do przyjęcia). Natomiast gdy wartość wszystkich funkcji cząstkowych celu $d_i = 1,00$ to wartość $D = 1$.

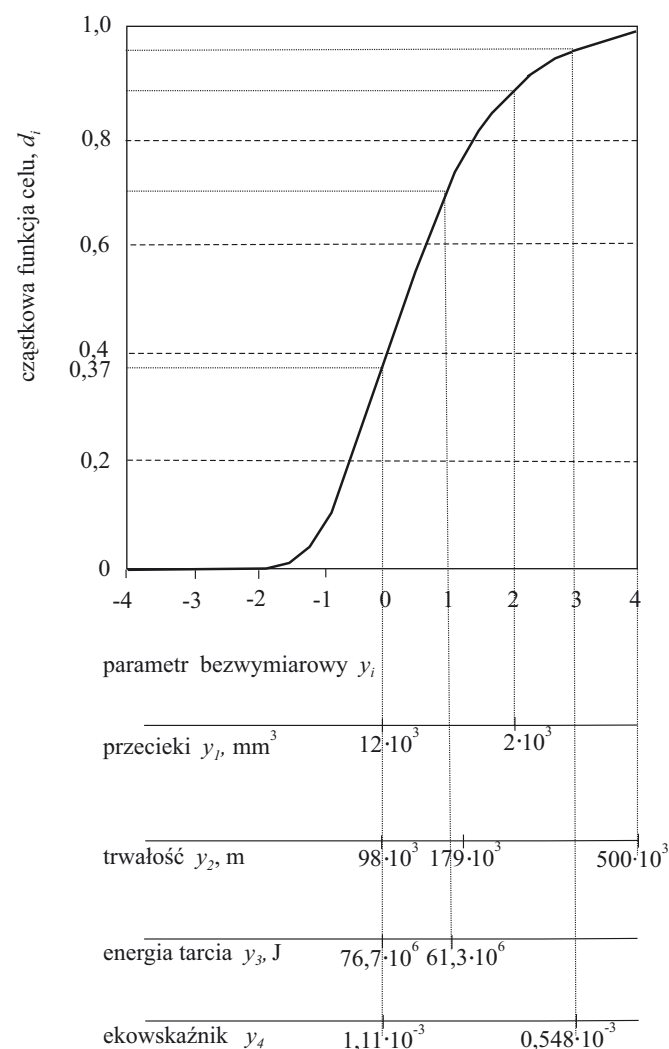
Za pomocą takiej skali jakości można dokonać przekształceń parametrów y_i z postaci naturalnej w bezwymiarową zakodowaną.

Cząstkowa funkcja celu d_i jest wyznaczana na podstawie bezwymiarowej postaci parametru y_i za pomocą równania (2) [16]

$$d_i = e^{-(e^{-y_i})} \quad (2)$$

Wartość $d_i = 0,37$ stanowi granicę dopuszczalności, jednocześnie jest to charakterystyczne miejsce przegięcia wykresu obrazującego zależność tej wartości od parametru bezwymiarowego y_i . Miejsu temu na osi zakodowanych parametrów odpowiada wartość $y_i = 0$.

Zakłada się, że liczba klas parametru mieści się w przedziale 3—6 (na plus i na minus). Na obrazującym odpowiednią krzywą rys. 2 przyjęto liczbę klas równą 4, przy czym w odniesieniu do trzech kryteriów występują po dwie — a w przypadku jednego kryterium (trwałość)



Rys. 2. Graficzny obraz zależności funkcji cząstkowej celu d_i od zakodowanego parametru bezwymiarowego y_i oraz sposób przekształcania parametrów y_i z postaci zwymiarowanej w postać bezwymiarową

Fig. 2. Graph of dependence of partial objective function d_i on the coded nondimensional parameter and the way of transformation of y_i parameters from the dimensional to nondimensional forms

ci) — 3 wartości parametrów. Przejścia na skalę bezwymiarową można dokonać poprzez wykreślenie, poniżej wykresu, poziomych osi ujmujących każdy z parametrów w postaci naturalnej (zwymiarowanej), a następnie odnajdując poprzez krzywą wartość funkcji cząstkowej celu d_i . W przypadku pozytywnego parametru (np. trwałości y_2), w badaniach przyjęto $y_2 = 0$ odpowiadające uzyskanej minimalnej wartości trwałości ($98\ 000\ \text{m}$), czyli wartości krytycznej $d_2 = 0,37$. Największej, wymienionej w literaturze [18], wartości trwałości ($500\ 000\ \text{m}$) przypisano $y_2 = 4$, stąd $d_2 = 1,00$. Wartość bezwymiarowego parametru odnosząca się do trwałości = $179\ 000\ \text{m}$ została obliczona na podstawie danych doświadczalnych z odpowiedniego układu równań liniowych.

Jeżeli parametr jest negatywny (np. wartość przecieków), to wartość krytyczna $d_1 = 0,37$ odpowiada wartości maksymalnej parametru ($12\ 000\ \text{mm}^3$), natomiast wartość minimalną parametru bezwymiarowego = 2 przyjęto dla $2\ 000\ \text{mm}^3$. Obie te wartości naturalne (zwymiarowane) zostały wyznaczone na podstawie danych doświadczalnych.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Badane uszczelnienia

Przedmiot badań stanowiło sześć różnych uszczelnień, mianowicie:

- typu U samouszczelniające (TPU + ok. 2,5 % mas. MoS_2) — dwa wymiary zabudowy,
- typu U aktywowane sprężyną (PTFE + 10 % mas. CF) — jeden wymiar zabudowy,
- typu U aktywowane sprężyną (PE-UHMW, „Mupuseal”) — trzy wymiary zabudowy.

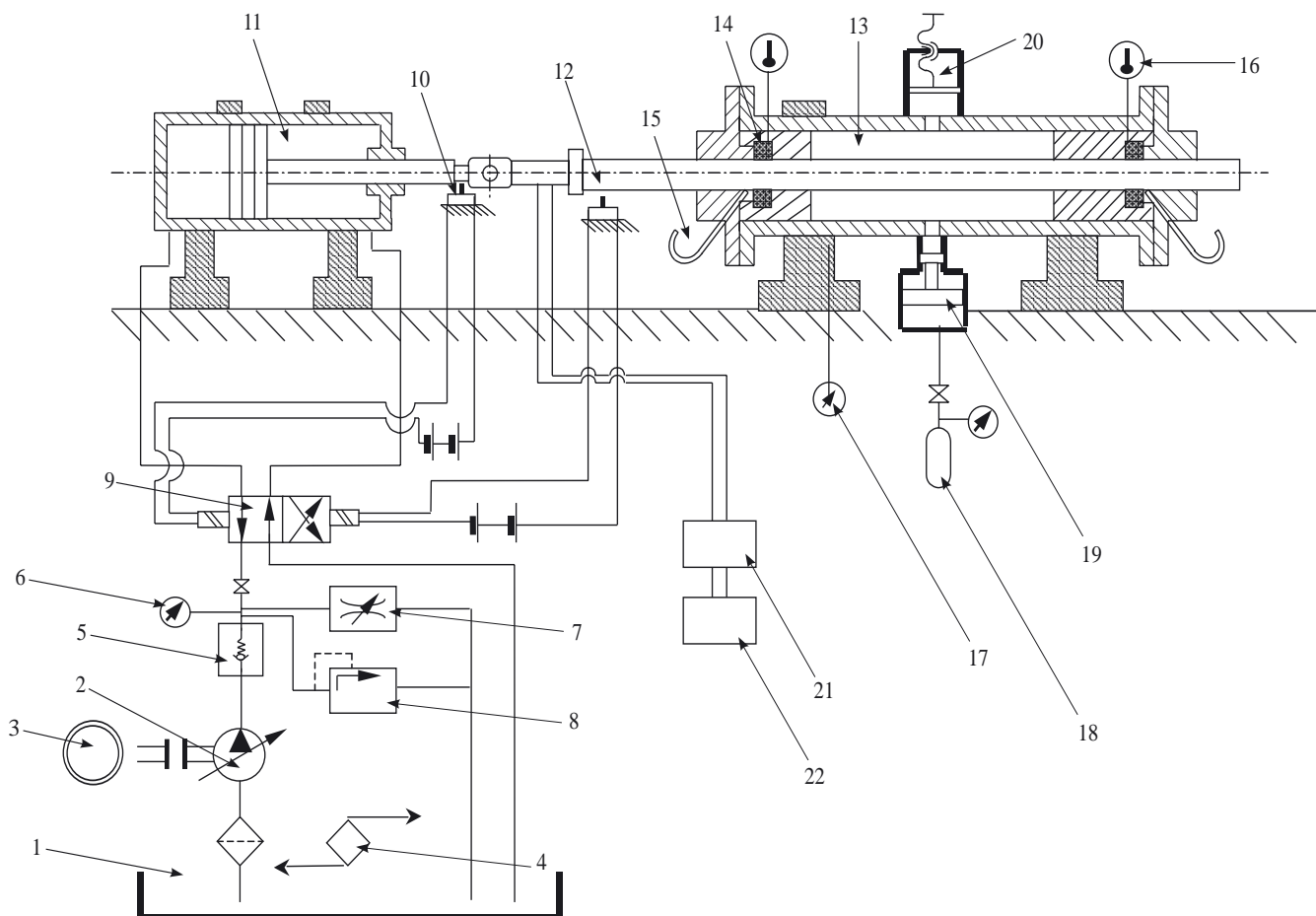
Stanowisko badawcze

Zaprojektowane i zbudowane na potrzeby pracy stanowisko badawcze (rys. 3) zostało wyposażone w następujące przyrządy pomiarowe: mechaniczny licznik cykli ruchów, czujniki i przetworniki temperatury $0..100\ ^\circ\text{C}/0..5\ \text{V}$, czujnik tensometryczny ze wzmacniaczem pomiarowym $\pm 4\ \text{kN}$ (siła ściskająca i rozciągająca) $\pm 5\ \text{V}$, a także kartę pomiarową PCL818L firmy Advantech oraz oprogramowanie firmy Agimag (przeznaczone do odczytu i zapisywania danych zebranych z karty pomiarowej).

Metodyka badań

W trakcie badań wyznaczano siłę tarcia, trwałość uszczelnień oraz objętość przecieków wody.

Podczas pracy ciągłej ciśnienie robocze wody w cylindrze badawczym utrzymywano na poziomie $8 \pm 0,5\ \text{MPa}$, prędkość średnia tłocznika wynosiła ok. $0,35\ \text{m/s}$, długość skoku tłocznika była równa $0,5\ \text{m}$, a czas trwania pełnego cyklu — ok. $3\ \text{s}$. Temperatura była stabilizo-



Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1 — zbiornik oleju, 2 — pompa zasilająca ukl. napędowy, 3 — silnik elektryczny, 4 — chłodnica, 5 — zawór zwrotny, 6 — manometr, 7 — zawór przelewowy, 8 — zawór bezpieczeństwa, 9 — rozdzielacz, 10 — wyłącznik krańcowy, 11 — cylinder napędowy, 12 — czujnik tensometryczny, 13 — cylinder z badanymi uszczelnieniami, 14 — badane uszczelnienie, 15 — naczynie pomiarowe, 16 — termometr, 17 — manometr, 18 — butla z azotem, 19 — multiplikator gazowo-hydrauliczny, 20 — ręczna pompka śrubowa, 21 — wzmacniacz sygnału, 22 — rejestrator siły tarcia
 Fig. 3. Scheme of hydraulic test stand: 1 — oil tank, 2 — supply pump for power transmission system, 3 — electric motor, 4 — radiator, 5 — check valve, 6 — manometer, 7 — overflow valve, 8 — safety-valve, 9 — separator, 10 — limit switch, 11 — power transmission cylinder, 12 — strain gauge, 13 — cylinder with tested seals, 14 — tested seal, 15 — measuring vessel, 16 — thermometer, 17 — manometer, 18 — nitrogen cylinder, 19 — gas-hydraulic intensifier, 20 — helical hand pump, 21 — signal amplifier, 22 — friction force recorder

wana, ale ze względu na bezwładność układu zmieniała się w przedziale 18–32 °C. Częstotliwość próbkowania siły tarcia $f = 100$ Hz. Cykl nagrzewania wody w cylindrze badawczym (na skutek tarcia) wynosił ok. 30 min, cykl chłodzenia ok. 5 min — krótki czas chłodzenia wynikał ze wstępnego obniżenia temperatury wody w układzie chłodzącym do ok. 10 °C. Przecieki wody zbierano do wężyków pomiarowych średnicy wewnętrznej 5 mm.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Kryteria techniczne doboru uszczelnień

Czasochłonne badania trwałości, prowadzone do chwili pełnej awarii (przecieku), dotyczyły par uszczelnień, a kompletne wyniki uzyskiwano w odniesieniu tyl-

ko do jednej — uszkodzonej — uszczelki z każdej pary, podczas gdy druga z uszczelnień nadal nadawała się do pracy. Miarą trwałości jest droga tarcia (czyli droga pracy uszczelki) pokonywana do wspomnianej chwili. Na przykład, po zbadaniu czterech par uszczelnień (8 sztuk) kompletne wyniki charakteryzują jedynie cztery uszczelki (po jednej z każdej pary), z bardzo małym prawdopodobieństwem — pięć (o ile jednocześnie zaczną przeciekać obie z badanej pary uszczelnień). Wymiana wyłącznie uszkodzonej uszczelki w danej parze wiąże się jednak ze znacznym ryzykiem uszkodzenia uszczelki nadającej się do pracy.

W celu wykorzystania wyników testów trwałości uszczelnień, które nie uległy awarii (uszkodzeniu) a przepracowały założoną liczbę cykli, zastosowano rozkład Weibulla [19], umożliwiającą interpretację przerwanych („uciętych”) badań. W toku wstępnej kwalifikacji odrzu-

ca się wszystkie uszczelnienia, których trwałość nie przekroczyła 10 000 m drogi tarcia (10 tys. cykli, skok 0,5 m) lub, ze względu na zbyt dużą siłę tarcia, nie udało się jej określić. W wyniku takiego sposobu postępowania liczba wyboru, spośród sześciu uszczelki przyjętych na początku do badań, została ograniczona do dwóch uszczelnień typu „Mupuseal 30412” i „Mupuseal 30413”, wykonanych z PE-UHMW.

T a b e l a 1. Wyniki badań trwałości par uszczelki „Mupuseal” z PE-UHMW

T a b l e 1. Results of durability tests of pairs of seals „Mupuseal” made of PE-UHMW

Uszczelki „Mupuseal 30412”		Uszczelki „Mupuseal 30413”	
Oznaczenie badania ^{*)}	Droga tarcia m	Oznaczenie badania	Droga tarcia m
F S	20 000	S S	60 000
F S	50 000	F S	79 000
F S	72 000	F S	101 300
S S	90 000	F S	152 000

^{*)} F — kompletne, S — ucięte.

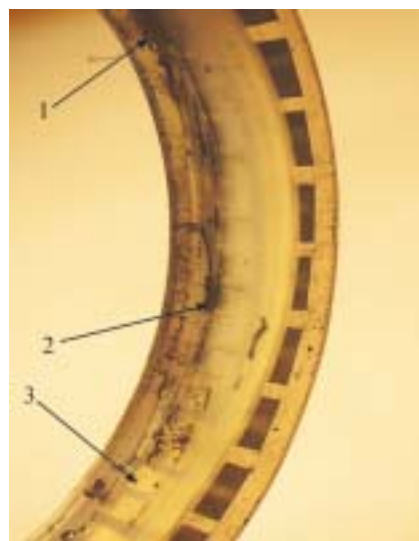


Rys. 4. Uszczelka „Mupuseal 30412” po 90 000 m drogi tarcia. Brak charakterystycznych oznak uszkodzenia. Śladowe ilości cząstek grafitu lub koksu pochodzą z elementów prowadzących wykonanych z PTFE+koks/grafit

Fig. 4. „Mupuseal 30412” after 90,000 m of friction distance. Characteristic signs of damage are missing. There are trace quantities of graphite or coke coming from the guide elements made of PTFE + coke/graphite

Do analizy trwałości z wykorzystaniem rozkładu Weibulla przyjęto dane wynikające z przecieków poszczególnych uszczelki (tabela 1). Badanie uznawano za kompletne (F), w przypadku, gdy przecieki przekraczały wartość: $q_w = 2 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ (uszczelki typu 30412) lub $q_w = 12 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ (uszczelki typu 30413). Badania, w których przecieki uszczelki nie osiągały podanych wyżej wartości uznawano za „ucięte” prawostronne (S). Do wyznaczenia poszczególnych funkcji rozkładu Weibulla oraz ich parametrów posłużono się programem „Weibull++6” firmy ReliaSoft Co. (USA) [20]. Tą metodą określono trwałość charakterystyczną, czyli długość drogi tarcia, po pokonaniu której 63,2 % populacji uszczelki ulega awarii; wynosi ona odpowiednio: uszczelki 30412 — ok. 98 700 m, uszczelki 30413 — ok. 179 200 m.

Rysunek 4 przedstawia uszczelkę „Mupuseal typ 30412”, na której, mimo charakteryzujących ją przecieków, uszkodzenia są niewidoczne. Uszczelka uległa jedynie zużyciu ściernemu. Zostało to wywołane niewytworzeniem się w tym przypadku warstwy smarnej pod wargą uszczelniającą w toku eksploatacji; przyczyną tego zjawiska był zły dobór potencjalnie samosmarnego uszczelnienia.



Rys. 5. Powierzchnia wewnętrzna uszkodzonej (zakres między strzałkami 1—3) wskutek pełzania zmęczeniowego uszczelki „Mupuseal 30413” po 101 000 m drogi tarcia z produktami zużycia w miejscu pełzania (strzałka 2). Elementy są wykonane z PTFE+koks/grafit

Fig. 5. Internal surface of „Mupuseal 30413” seal damaged (range before 1—3 arrows) due to fatigue creep after 101,000 m of friction distance, with wear products at creep area (arrow 2). Guide elements made of PTFE + coke/graphite

Zużycie zmęczeniowe, prowadzące do uszkodzeń uszczelki typu 30413, jest na powierzchni roboczej zdecydowanie bardziej widoczne (rys. 5) i prowadzi najczęściej do miejscowego (pod wpływem pełzania) wydłużenia wargi uszczelniającej.

Kryterium ekonomiczne doboru uszczelnień

W celu wyznaczenia ilości energii traconej podczas pracy każdej z uszczelki przeanalizowano zmiany siły tarcia F_u pojedynczej uszczelki w funkcji przebytej drogi tarcia (s) w warunkach ciśnienia roboczego $p = 8$ MPa, a następnie dokonano aproksymacji wartości F_u funkcjami stopnia trzeciego $F_u(s)$ (rys. 6 i rys. 7).

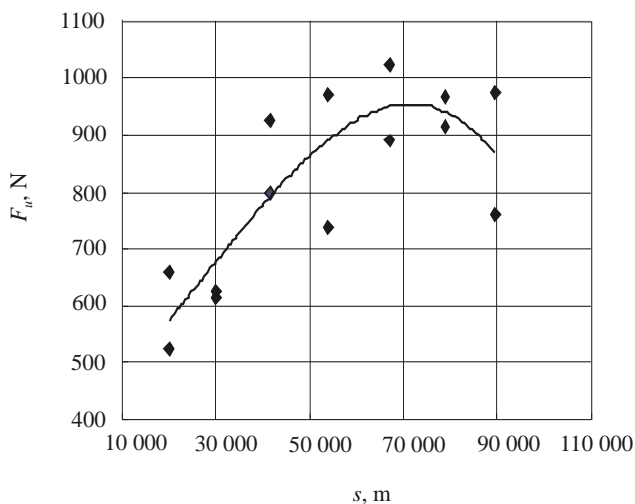
Funkcje te mają następujące postaci:

$$F_u(s) = 479,544 + 5,635 \cdot 10^{-4} s + 2,653 \cdot 10^{-7} s^2 - 2,501 \cdot 10^{-12} s^3 + \text{eps} \quad (3)$$

w przypadku uszczelki typu „Mupuseal 30412” oraz

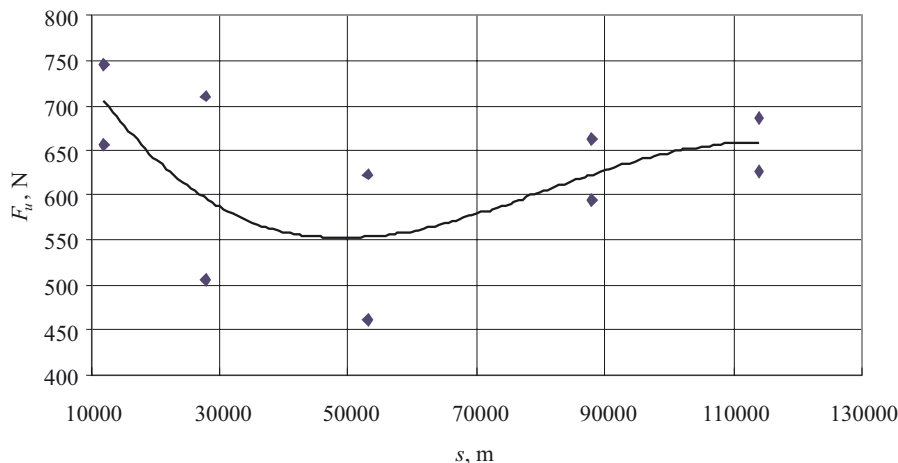
$$F_u(s) = 857,111 - 0,015 \cdot s + 2,216 \cdot 10^{-7} s^2 - 9,326 \cdot 10^{-13} s^3 + \text{eps} \quad (4)$$

w przypadku uszczelki typu „Mupuseal 30413”; w równaniach tych symbol eps oznacza błąd statystyczny.



Rys. 6. Zależność siły tarcia F_u uszczelki typu „Mupuseal 30412” w funkcji drogi tarcia aproksymowana funkcją wielomianową trzeciego stopnia [równanie (3)]

Fig. 6. Dependence of friction force F_u of „Mupuseal 30412” type seals on friction path, approximated by multinomial cubic function [equation (3)]



Rys. 7. Zależność siły tarcia F_u uszczelki typu „Mupuseal 30413” w funkcji drogi tarcia aproksymowana funkcją wielomianową trzeciego stopnia [równanie (4)]

Fig. 7. Dependence of friction force F_u of „Mupuseal 30413” type seals on friction path, approximated by multinomial cubic function [equation (4)]

Wartość traconej energii tarcia (E_t) można obliczyć całkując funkcje aproksymujące siłę tarcia $F_u(s)$ w przedziale drogi tarcia $0 \leq s \leq 100\,000$ m [równ. (5)].

$$E_t = \int_0^{100\,000} F_u(s) ds \quad (5)$$

Tak uzyskane wartości E_t wynoszą: uszczelki 30412 — ok. 67,7 MJ, uszczelki 30413 — ok. 61,3 MJ.

Ponieważ koszt wykonania obu typów uszczelki jest zbliżony, to z ekonomicznego punktu widzenia korzystniejsze jest stosowanie uszczelki „Mupuseal 30413”.

Kryterium ekologiczne doboru uszczelnień

Ekowskażnik 99 (służący, jak już wspomniano, do oszacowania wpływu związanego z wytwarzaniem, użytkowaniem, a następnie utylizacją produktów na środowisko naturalne) w odniesieniu do poszczególnych uszczelki typów 30412 i 30413 obliczano w programie „SimaPro 5” [21]. Dwukrotnie mniej uciążliwe dla środowiska (mniejszy ekowskażnik 99) okazały się uszczelki 30412; prawdopodobnie jest to związane z dwa razy mniejszą masą uszczelki tego typu. Warto też podkreślić, że badane uszczelnienia typu „Mupuseal” z PE-UHMW charakteryzowały się ok. 5-krotnie mniejszą wartością omawianego ekowskażnika 99 niż uszczelnienia wytworzone z układu PTFE + 10 % CF.

Możliwości oceny użyteczności uszczelnień na podstawie analizy wielokryterialnej

Wyboru właściwej uszczelki, z uwzględnieniem kryteriów technicznych, ekonomicznych i środowiskowych (często sprzecznych ze sobą) dokonywano z zastosowaniem wspomnianej już metody optymalizacji wielokryterialnej. Różnica wyników odnoszących się do dwóch badanych typów uszczelki, nie przekraczała 6 % wartości funkcji celu D , co w tego rodzaju badaniach i zgodnie z przyjętą metodą, mieści się w granicach błędów statystycznych.

Przydatność poszczególnych uszczelki do danej aplikacji należy zatem analizować pod kątem parametrów, których wartości w odniesieniu do każdego z obu badanych typów uszczelnień zdecydowanie różnią się między sobą.

Mianowicie, od uszczelki wodnych układów hydraulicznych, działających z małą intensywnością ruchu — użytkowanych w szpitalach, zakładach spożywczych, zakładach papierniczych lub chemicznych — wymagana jest duża szczelność, mniej ważna okazuje się natomiast trwałość i zużycie energii. W takich aplikacjach właściwe byłoby zastosowanie uszczelki, a ściślej uszczelnienia złożonego z uszczelki „Mupuseal 30412” i z elementów prowadzących z układu PTFE+koks/grafit. Od tego rodzaju zestawów materiałowych można bowiem oczekiwać dużej szczelności, lecz jednocześnie zdecydowanie mniejszej trwałości i gorszej sprawności (duże straty mocy). Wyznaczona wartość trwałości charakterystycznej tych uszczelki pozwala na przewidywanie wieloletniego (ale sporadycznego) użytkowania cylindrów z powyżej wymienionymi zestawami uszczelnień.

Badania wszystkich typów uszczelki prowadzono bez ciągłego przepłukiwania cylindra badawczego wodą, produkty zużycia pozostawały więc wewnątrz układu, powodując mniejszą trwałość uszczelki serii „30412”. Uszczelki te nosiły wyłącznie ślady zużycia ściernego (por. rys. 4), nie wykazując jednocześnie charakterystycznego dla właściwie dobranych i pracujących uszczelki, zużycia zmęczeniowego (pełzanie).

Natomiast do pracy w wodnych układach hydraulicznych maszyn roboczych (leśnictwo, rolnictwo, kopalnie odkrywkowe, górnictwo i hutnictwo) właściwsze jest zastosowanie uszczelki typu 30413, bowiem ważniejsze tam jest zapewnienie dużej trwałości, nawet kosztem przecieków. W badaniach uszczelki takie uległy zużyciu zmęczeniowemu (por. rys. 5), co świadczy o ich optymalnym — w odniesieniu do danej średnicy tłoczyska — wyborze.

WNIOSKI

Analiza trwałości i szczelności — dwóch podstawowych kryteriów wyboru badanych uszczelnień — pozwala na następujące stwierdzenia:

— Uszczelnienia charakteryzujące się większymi przeciekami (mniejszą szczelnością spowodowaną większym zużyciem zmęczeniowym) cechuje większa trwałość, natomiast dużej szczelności towarzyszy mniejsza trwałość uszczelnienia.

— Zużycie ściernie wargi uszczelniającej świadczy o nieprawidłowym doborze uszczelnienia (niewytworzenie się warstwy smarnej).

— Energia tarcia tracona podczas pracy uszczelnienia jest, oprócz ceny, istotnym kryterium ekonomicznym. Właściwy dobór uszczelnienia pozwala na ograniczenie strat tej energii, a tym samym na obniżenie kosztów eksploatacji.

— Kryteria ekologiczne w zastosowaniu do tak małych obiektów technicznych stają się drugoplanowe, zwłaszcza ze względu na wspomnianą stosunkowo niewielką wartość ekowskaźnika 99.

LITERATURA

1. Isaksson O.: *Wear* 1998, **216**, 97.
2. Okularczyk W.: „Planowanie badań uszczelnień polimerowych przewidzianych do pracy w hydraulice wodnej” w pracy zbiorowej „Stosowanie i przetwórstwo materiałów polimerowych” (red. Koszkuł J.), Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998, str. 159—170.
3. Weiss H.: *Ölhydraulik Pneumatik* 1999, **43**, nr 2, 104.
4. Koszkuł J., Torchała I.: „Badania tribologiczne kompozytów na podstawie politetrafluoroetyleny” w pracy zbiorowej „Postęp w przetwórstwie tworzyw termoplastycznych” (red. Koszkuł J.), Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1995, str. 165—172.
5. Wieleba W., Ziemiński K.: *Trybologia* 1995, **5**, 554.
6. Watanabe M.: *Wear* 1992, **158**, 79.
7. Brink R.V., Czernik D. E., Horve L. A.: „Handbook of fluid sealing”, McGraw-Hill, Inc., New York 1993.
8. Bisztray-Balku S.: *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.* 1999, **43**, nr 1, 63.
9. Schulte R., Cleff B i in.: *Inżynieria Biomateriałów*, 16.
10. Xiong D., Ge S.: *Wear* 2001, **250**, 242.
11. Wang A., Essner A., Polineni V. K., Stark C., Dumbleton J. H.: *Tribol. Intern.* 1998, **31**, nr 1—3, 587.
12. www.economos.at
13. Okularczyk W.: *Hydraul. i Pneumatyka* 2001, **6**, 24.
14. Galas Z., Nykowski I., Żółkiewski Z.: „Programowanie wielokryterialne”, PWE, Warszawa 1987.
15. Dobosz M.: „Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań”, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
16. Achnazarowa S. Ł., Kafarow W. W.: „Optymalizacja eksperymentu w chemii i technologii chemicznej”, WNT, Warszawa 1982.
17. Kolman R.: „Inżynieria jakości”, PWE, Warszawa 1997.
18. H₂O Cylinder. Bulletin 1250/1. Parker Hannifin GmbH, Cylinder Division, Köln, Niemcy.
19. www.versuchmethoden.de
20. www.weibull.com
21. www.pre.nl