

KSZTAŁTOWANIE WŁASNOŚCI EKSPLOATACYJNYCH PARY ŚLIZGOWEJ POPRZECZ ZMIANY GEOMETRYCZNEJ TEKSTURY POWIERZCHNI

Bogdan Antoszewski

Centrum Laserowych Technologii Metali, Politechnika Świętokrzyska -Polska Akademia Nauk
25-314 Kielce Al.1000-lecia PP7, e-mail:ktrba@tu.kielce.pl)

Streszczenie. Referat dotyczy badań eksperymentalnych których celem jest ocena własności eksploatacyjnych pary ślizgowej z geometryczną teksturą powierzchniową. Badania o charakterze porównawczym wykonano na testerze tribologicznym T-01 i dotyczą one płaskiej pary ślizgowej modelującej pracę łożyska wzdłużnego. Ocenie poddano zmiany oporów tarcia próbek z SiC z teksturą o różnym stopniu zaczernienia przy zmiennych obciążeniach.

Badania prowadzono metodą planowanego eksperymentu, a ich wynikiem są między innymi mapy tarcia określające zakres parametrów pracy łożyska, przy których, dla danego obciążenia występuje tarcie płynne. Na podstawie obserwacji procesów zużycia zidentyfikowano i opisano zjawiska opóźniające destrukcję materiału.

Słowa kluczowe: opory tarcia, łożysko ślizgowe, tekstura.

WSTĘP

Decydującymi o przydatności w eksploatacji parametrami pracy pary ślizgowej są opory tarcia i trwałość. Siła tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami, jest uzależniona od kształtowania się wzajemnych relacji pomiędzy elementarnymi procesami zachodzącymi w szczelinie. Do procesów tych zaliczyć należy: hydrostatyczne i hydrodynamiczne oddziaływanie medium, adhezję medium do podłoża, zmianę geometrii szczeliny poprzez odkształcenia cieplne i mechaniczne, odprowadzanie ciepła, przemiany fazowe i reologiczne cieczy w szczelinie. Te oddziaływania z kolei nie mogą być rozpatrywane w oderwaniu od własności fizycznych medium i powierzchni ograniczających szczelinę (np. lepkość, zwilżalność) a także kinematycznych i dynamicznych relacji pomiędzy wymienionymi czynnikami. W zależności od wymienionych czynników, te elementarne procesy mogą mieć synergiczny lub antagonistyczny wpływ na minimalizację oporów tarcia w szczelinie pary ślizgowej. Na tym tle należy rozpatrzeć rolę makro i mikrogeometrii powierzchni tworzących szczelinę. Odstępstwa od powierzchni gładkiej i płaskiej, jeśli mają regularny i odpowiednio ukształtowany charakter, mogą być synergicznymi wobec takich pożądanych cech pary ślizgowej, jakimi są: nośność, trwałość, niezawodność. Wymienione wyżej aspekty wskazują jak istotną rolę w wytwarzaniu ślizgowych par tarcia odgrywają technologie in-

żynierii powierzchni. Do wytwarzania powierzchni niejednorodnych oraz posiadających teksturę wykorzystywane są obecnie najnowsze technologie inżynierii powierzchni a w szczególności technologie laserowe i elektroerozyjne.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

W ujęciu modelowym ślizgowej pary tarcia z udziałem czynnika smarującego w procesach zachodzących w styku, istotne znaczenie ma wartość nośności pary ślizgowej. W ogólnym przypadku wartość nośności pary ślizgowej jest określona zależnością:

$$W = W_m + W_h, \quad (1)$$

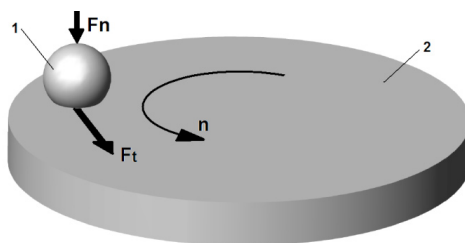
gdzie: W_m – siła nośna wynikająca z kontaktu mechanicznego mikronierówności; W_h – siła nośna filmu smarnego w szczelinie.

Przy określonej wartości siły obciążającej ustala się stan równowagi, któremu odpowiada wysokość szczeliny $h_{\min}$. Jeżeli wartość $h_{\min}$ jest większa od wysokości mikronierówności to mamy do czynienia z warunkami tarcia płynnego. W przypadku przeciwnym, zachodzi tarcie mieszane. Zakładając że $h > h_{\min}$ w dalszej analizie można rozważać tę część siły nośnej, która pochodzi od filmu smarnego:

$$W_h = W_{h1} + W_{h2}, \quad (2)$$

Całkowita wartość nośności filmu smarnego jest uzależniona od nośności generowanej na obszarach płaskich W_{h1} i nośności generowanej przez obszary tworzące teksturę W_{h2} . W obydwu wymienionych obszarach mają miejsce różne mechanizmy powstawania siły nośnej. Ogólnie mają one charakter hydrostatyczny lub hydrodynamiczny. Dla tekstury w postaci wgłębień w kształcie sferycznym, walcowym lub ściętego stożka, decydujące znaczenie będą miały rozmiary wgłębień oraz stopień wypełnienia nimi powierzchni tarcia. Zagadnienie to rozpatrywano modelowo analizując zjawiska przepływowe [1, 2, 3, 6]. W tym opracowaniu skoncentrowano się jedynie na metodzie doświadczalnej.

Do badań wykorzystano tester tribologiczny T-01M, w którym zamiast typowego trzpienia, zainstalowano odpowiednio ściętą kulkę łożyskową o średnicy $\varnothing = 6,3$ mm. Kulka była ścięta w ten sposób, że tworzyła kolistą powierzchnię płaską o średnicy $\varnothing = 4,5$ mm.



Rys. 1. Schemat pary trącej testera tribologicznego T-01M; 1- ścięta kulka, 2- tarcza z powierzchnią teksturowaną

Fig. 1. Diagram of the friction pair in the T-01M tribological tester; 1- truncated sphere, 2- disc with textured surface

Powstała w ten sposób para ślizgowa ścięta kulka-tarcza ma walory pary tarcia o styku rozłożonym, z możliwością samo nastawiania się powierzchni trącej do tarczy co jest zapewnione konstrukcją uchwytu o powierzchni kulistej.

W trakcie badań wykorzystano pełen zakres możliwości zmian parametrów roboczych stanowiska:

- prędkość obrotowa zmieniana stopniowo od 100 do 700 obr/min,
- obciążenie węzła tarcia siłą normalną od 4,9 do 39,2 N.

Próbki do badań (tarcze) stanowiły pierścienie o wymiarach $\varnothing 37 \times \varnothing 26,5 \times 8$ wykonane ze spiekane go SiC – były to oryginalne, handlowe, atestowane pierścienie do uszczelniania czołowego.

W badaniach przeprowadzono eksperyment planowany w oparciu o program statyczny, zdeteminowany, wieloczynnikowy, rotatabilny z powtórzeniami PS/DS- λ .

W oparciu o badania wstępne i wyznaczony obszar zmienności parametrów tekstury, określono przedziały zmienności wielkości wejściowych, dla których przyjęto oznaczenia:

$$x_k; k = 1, 2, \dots, i; x_k \in [x_{kmin}, x_{kmax}] , \quad (3)$$

gdzie: x_k - wielkość wejściowa; i - liczba wielkości wejściowych, $i = 2$.

Przyjęto pięciopoziomowy program badań i przedział normowania $[-\alpha, \alpha]$; $\alpha = 1,414$, odpowiadający ramionom gwiazdnym planu PS/DS- λ oraz następujące oznaczenia wielkości kodowych zmiennych niezależnych :

$$x_k \equiv X_k \equiv Xk; x_k \equiv Xk \in [-\alpha, \alpha] , \quad (4)$$

Obliczono odpowiadające im wartości parametrów wejściowych dla poszczególnych układów czynników, według następujących zależności:

$$x_k = \exp \left[\frac{\ln x_{kmin} + \ln x_{kmax}}{2} + \frac{\ln x_{kmax} - \ln x_{kmin}}{2\alpha} \alpha_k \right] , \quad (5)$$

gdzie: $\alpha_k = \{-1,414, -1, 0, 1, 1,414\}$ oznacza promień aktualnego ramienia przestrzeni badanej - wartość kodu.

Macierz planowania eksperymentu przedstawiono w tabeli 1.

Parametry charakteryzujące teksturę zostały tak dobrane, aby obejmowały cały zakres zmian reżimów tarcia. Ze względu na wartość wysokości szczeliny określoną jako 3σ (gdzie σ to równoważne odchylenie standardowe chropowatości stykających się powierzchni) przyjęto głębokość każdego pojedynczego wgłębienia na poziomie 16 μm . Przyjęte oznaczenia i wartości zmiennych niezależnych oraz przedziałów zmienności dla eksperymentu własności, tribologiczne powierzchni z teksturą, zamieszczono w tabeli 2.

Na podstawie literatury [4, 5] i prac własnych [1] oraz analizy zachodzących w parze trącej zjawisk fizycznych przyjęto następujące zmienne niezależne:

- średnica wgłębienia $2r_p$,
- stopień zaczernienia Sp .

Wartość zmiennych wejściowych eksperymentu obliczono według wyżej podanego wzoru dla przyjętych przedziałów zmienności parametrów wejściowych ($2r_p$, Sp) dla powierzchni z wgłębieniami tworzącymi teksturę i przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 1. Macierz planowania eksperymentu PS/DS- λ Tab. 1. Design-of-experiment matrix according to PS/DS- λ

Numer doświadczenia	Wartości kodowane	
	x_1	x_2
1	- 1	- 1
2	+ 1	- 1
3	- 1	+ 1
4	+ 1	+ 1
5	- 1,414	0
6	+ 1,414	0
7	0	- 1,414
8	0	+1,414
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

Tab. 2. Oznaczenia i wartości przedziałów zmienności parametrów obróbki

Tab. 2. Notations and values of the ranges of variability of the process parameters

	Wielkości wejściowe	Jednostki	Oznaczenia zmiennych	Przedział zmienności	
				x_{kmin}	x_{kmax}
1	Średnica wgłębienia $2r_p$	μm	X_1	150	70
2	Stopień zaczernienia Sp	[%]	X_2	50	15

Tab. 3. Wartości zmiennych niezależnych dla powierzchni z teksturą

Tab. 3. Values of the independent variables for a textured surface

	- 1,414	- 1	0	1	1,414
X_1	70	78	102	134	150
X_2	15	18	27	42	50

Na pierścieniach zgodnie z zaplanowanym programem naniesiono tekstury o parametrach przedstawionych w tabeli 4.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe widoki tekstury powierzchni pierścieni (mikroskop skaningowy Joel).

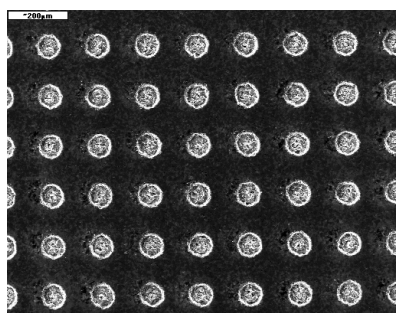
Analiza statystyczna uzyskanych wyników badań eksperymentalnych obejmowała:

- aproksymację funkcji obiektu badań,
- statystyczną weryfikację adekwatności funkcji aproksymującej,
- statystyczną weryfikację istotności współczynników funkcji aproksymującej.

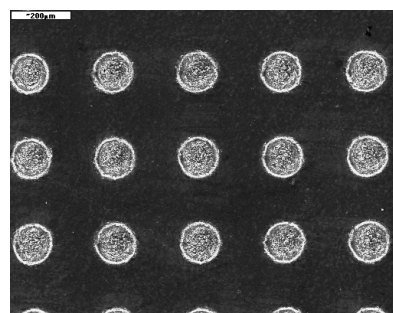
Tab. 4. Parametry charakteryzujące teksturę

Tab. 4. Parameters characterizing the texture

L.P.	Średnica wglębienia $2r_p$ [μm]	Odległość między środkami osi symetrii wglębień [μm]	Stopień zaczerwienienia Sp [%]	Głębokość wglębienia [μm]
1	78	162	18	16
2	134	279	18	16
3	78	106	42	16
4	134	183	42	16
5	70	256	27	16
6	150	119	27	16
7	102	128	15	16
8	102	233	50	16
9	102	174	27	16
10	102	174	27	16



a)



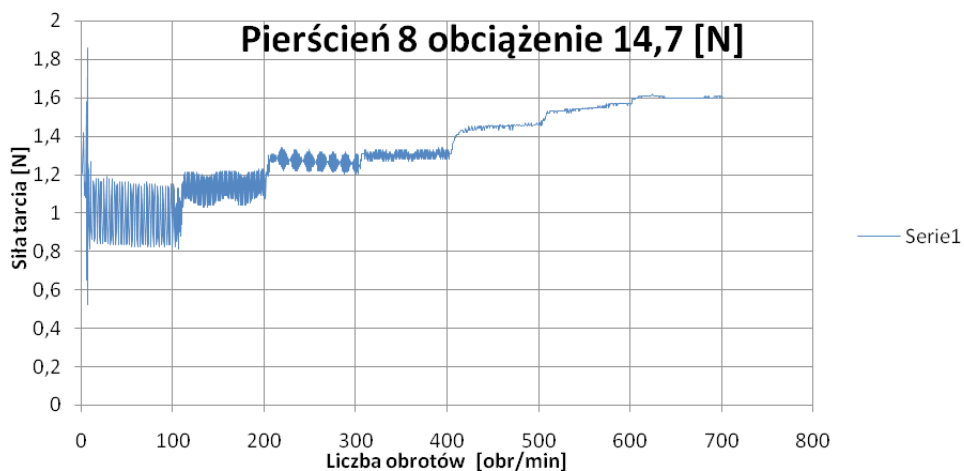
b)

Rys. 2. Widok mikroskopowy tekstury powierzchniowej pierścieni SiC przygotowane do badań. a) $2r_p = 102$ μm , $Sp=27\%$ (pow.100X), b) $2r_p = 134$ μm , $Sp = 18\%$ (pow.100X)

Fig. 2. Microscopic view of the textured surface of the SiC rings before the tests a) $2r_p = 102$ μm , $Sp=27\%$ (magnification 100X), b) $2r_p = 134$ μm , $Sp = 18\%$ (magnification 100X)

Badania na testerze tribologicznym realizowano w rozszerzonym zakresie, w odniesieniu do badań, metodą planowanego eksperymentu. Wykorzystano pełny zakres możliwych obciążeń stanowiska badawczego. Dzięki temu, zdołano uzyskać dodatkowe informacje, na temat obszarów tarcia płynnego i mieszanego. Cykl badawczy dla każdego obciążenia tj.: 4,9; 9,8; 14,7; 19,6; 24,5; 29,4; 34,3; i 39,2 N rozpoczynano od prędkości 100 obr/min po czym nie zmieniając obciążenia po przebyciu drogi tarcia około 500 m, zwiększano prędkość kolejno o 100 obr/min aż do osiągnięcia 700 obr/min. Próbkę przed każdym biegiem smarowano kroplowo olejem parafinowym. Rejestrowano opory tarcia oraz przemieszczenie próbki. Te wskaźniki procesu tarcia, uwzględniane łącznie, pozwalają odnieść się do tego, z jakim reżimem tarcia mamy do czynienia. Do oceny średniej, uwzględniano punkty pomiarowe z ostatnich minut biegu.

Do analizy przyjęto wyniki pomiarów wykonane według planu zbliżonego do centralnego kompozycyjnego dla dwóch wielkości wejściowych, i jednej wielkości wyjściowej przy 5 powtórzeniach w centrum.



Rys. 3. Przykładowy przebieg biegu badawczego – pierścień nr 8 , obciążenie 14,7 N

Fig. 3 . Example data obtained for ring 8 under a load of 14.7 N

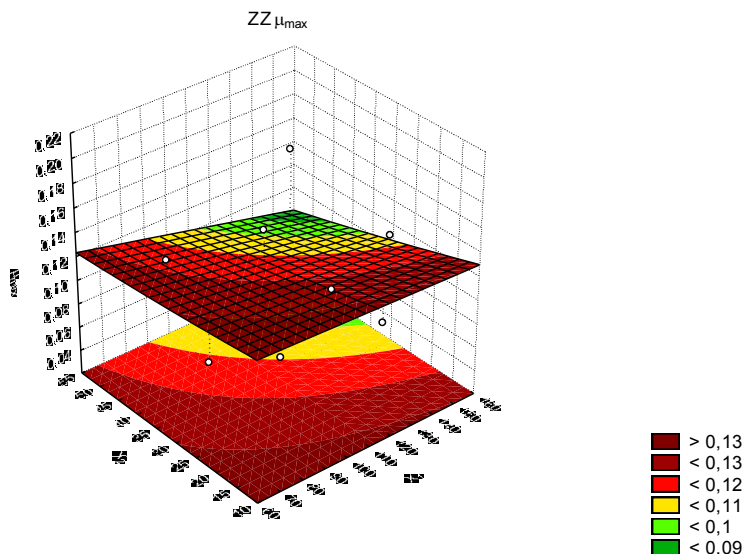
W tabeli 5 przedstawiono wyniki pomiarów dla jednej wielkości wyjściowej zrealizowane przy rzeczywistych nastawach wielkości wejściowych.

Tab. 5. Wyniki pomiarów

Tab. 5. Measurement results

Lp.	Czynniki wejściowe		Czynniki wyjściowe
	Średnica wgłębienia [μm]	Stopień zaczernienia [%]	μ_{max}
	Kod		
	x_1	x_2	y_1
	Wartości		
1	78	18	0,206
2	134	18	0,157
3	78	42	0,130
4	134	42	0,178
5	70	27	0,086
6	150	27	0,050
7	102	15	0,146
8	102	50	0,087
9	102	27	0,062
10	102	27	0,112
11	102	27	0,118
12	102	27	0,120
13	102	27	0,115

Przeprowadzone analizy statystyczne prowadzą do modelu zredukowanego a uzyskana powierzchnia odpowiedzi jest przedstawiona poniżej na wykresie przestrzennym.



Rys. 4. Wykres przestrzenny odpowiedzi modelu

Fig. 4. Spatial diagram of the model response

Model regresyjny dla rzeczywistych wielkości wejściowych nie może być bezpośrednio wyznaczony, gdyż z powodu zredukowania nieistotnych efektów można stosować wyłącznie współczynniki dla wielkości unormowanych (kodowanych):

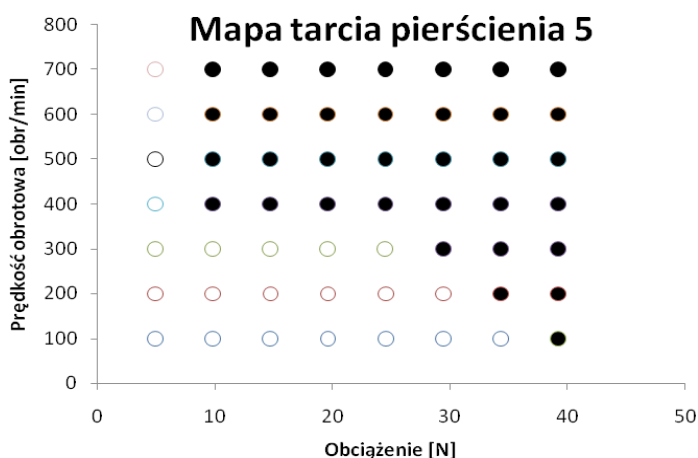
$$\mu_{\max} = 0,109 + 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot X_2^2 - 3 \cdot 10^{-2} \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (6)$$

Po podstawieniu wzorów normujących uzyskuje się wzór modelu dla rzeczywistych wielkości wejściowych:

$$\mu_{\max} = 0,109 + 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{x_2 - 110}{28,3} \right)^2 - 3 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{x_1 - 32,5}{12,4} \right) \cdot \left(\frac{x_2 - 110}{28,3} \right), \quad (7)$$

Przedstawione wyniki badań wskazują, że najniższe wartości współczynników tarcia uzyskuje się stosując dla wgłębień o średnicach w zakresie 138 do 150 μm i stopniu zaczernienia 42 do 50%. Uzyskany wynik jest zgodny z wcześniej przeprowadzoną numeryczną analizą zjawisk hydrodynamicznych w szczelinie [1]. Analiza przebiegów zmienności wartości współczynnika tarcia umożliwia sporządzenie map tarcia, obrazujących rozłożenie parametrów p, v (nacisk prędkość ślizgania), przy których występuje tarcie płynne i mieszane.

Na podstawie uzyskanych wyników dla każdego z pierścieni można zbudować „mapę tarcia” przedstawiającą zakresy parametrów pracy modelowej pary ślizgowej przy których występują warunki tarcia płynnego (punkty bez wypełnienia) i tarcia mieszanego (punkty zaczernione). Rozpoznanie tych parametrów pracy pozwala dobrać odpowiednią teksturę do obciążenia pary tarcia.



Rys. 5. Mapa tarcia dla pierścienia nr 5

Fig. 5. Friction map for ring 5

PODSUMOWANIE

1. Pary ślizgowe posiadające powierzchnie robocze z geometryczną teksturą powierzchniową posiadają różne wartości współczynnika tarcia oraz nośność, co uzależnione jest od parametrów tekstury. Oznacza to, że dla danego obciążenia można zaprojektować powierzchnię z teksturą, która zapewni osiągnięcie wymaganej nośności pary tarcia.
2. Z badań eksperymentalnych wynika, że pozytywny efekt teksturowania jest tym bardziej zauważalny gdy średnice wgłębień są większe oraz im większy jest stopień zaczernienia. Oznacza to, że w badanych zakresach zmienności czynników wejściowych, średnice wgłębień, powinny mieścić się w granicach 138 do 150 μm a stopień zaczernienia 42 do 50%.

LITERATURA

1. Antoszewski B. i inni.: Projekt badawczy nr 4 T07B 04730, 2008.
2. Erdemir A.: Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. *Tribology International* 2005, 38, s.249-256.
3. Etsion I.: State of the Art in Laser Surface Texturing. *Transaction of the ASME* 2005 Vol. 127.
4. Kovalchenko A., Ajayi A., Erdemir A., Fenske G., Etsion I.: The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. *Tribology International* 2005, 38, s.219-225.
5. Wakuda M., Yamauchi Y., Kanazaki S., Yasuda Y.: Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. *Wear* 2003, 254, s.356-363.
6. Yu X.Q., He S., Cai R.L.: Frictional characteristics of mechanical seals with a laser textured seal face. *Journal of Materials Processing Technology* 2002, 129, s.463-466.

SHAPING THE OPERATIONAL PROPERTIES OF SLIDING PAIRS BY CHANGING THEIR GEOMETRIC SURFACE TEXTURE

Summary. The operational properties of sliding pairs with textured surfaces were assessed using the Design of Experiment (DOE) method. The study focused on the changes in the friction resistance of SiC specimens whose texture had different degrees of blackening under variable loads. A comparative analysis was performed by means of a T-01 tribological tester for a flat sliding pair, which modeled the operation of a longitudinal bearing.

The range of parameters responsible for the operation of the bearing at fluid friction under a certain load was determined basing on the friction maps developed during the experiment. By observing the wear processes, it was possible to identify and describe the phenomena delaying the material failure.

Key words: friction resistance, sliding bearing, texture.