

Bogdan ANTOSZEWSKI*, Norbert RADEK*

OCENA WPŁYWU ZWILŻALNOŚCI NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE POWIERZCHNI Z TEKSTURĄ

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF WETTABILITY ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TEXTURED SURFACES

Słowa kluczowe:

ograniczanie tarcia, tekstura, mikroobróbka laserowa, energia powierzchniowa

Key words:

reduced friction, texture, laser micro-machining, surface energy

Streszczenie

Laserowe teksturowanie powierzchni jest aktualnie najbardziej rozwiniętą techniką wytwarzania w sposób powtarzalny, szybki i ekonomiczny mikrowgłębień (rowki, dziurki, szewrony i inne) na powierzchni elementów maszyn. Głównym celem tworzenia tekstury powierzchniowej jest redukcja oporów tarcia oraz zużycia współpracujących części. W wielu pracach wykazano, że teksturowanie powierzchni zwiększa odporność na zacieranie i przy zużywaniu poprzez fretting, a także jest stosowane wszędzie tam, gdzie mają znaczenie

* Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali, al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, tel. (041) 34 24 539, e-mail: ktrba@tu.kielce.pl, norrad@tu.kielce.pl

właściwości adhezyjne warstw powierzchniowych (łączenie materiałów, nakładanie powłok, techniki drukarskie, warstwy z biologicznie i chemicznie aktywną powierzchnią itp.).

W pracy podjęto próbę powiązania wybranych parametrów topografii powierzchni teksturowanej z jej energią powierzchniową i właściwościami tribologicznymi wykorzystując możliwości programu Statistica. Uzyskane wyniki pozwalają między innymi stwierdzić, że: parametrami tekstury powierzchniowej, które mają największy wpływ na wartość współczynnika tarcia w obszarze tarcia płynnego, są wartość swobodnej energii powierzchniowej, stopień zacierzenia (Sp) oraz wzajemna odległość krawędzi mikrowgłębień ($L-d$).

WPROWADZENIE

Badania zwilżalności i swobodnej energii powierzchniowej są obiektem zainteresowań badaczy wielu dyscyplin naukowych [L. 1]: fizyki, chemii, inżynierii materiałowej oraz biotechnologii. Zwilżalność materiałów wykorzystywanych w przemyśle różnymi cieczami ma duże znaczenie praktyczne w procesach przemysłowych, takich jak klejenie, uszczelnianie, malowanie, drukowanie oraz nanoszenie różnego rodzaju powłok ochronnych. Jedną z aktualnie najbardziej intensywnie rozwijających się technologii kształtowania właściwości powierzchniowych, w tym również zwilżalności i energii powierzchniowej, jest teksturowanie powierzchni, a zwłaszcza z wykorzystaniem techniki laserowej.

Laserowe teksturowanie powierzchni jest aktualnie najbardziej rozwiniętą techniką wytwarzania w sposób powtarzalny, szybki i ekonomiczny mikrowgłębień (rowki, dziurki, szewrony i inne) na powierzchni elementów maszyn. Głównym celem tworzenia tekstury powierzchniowej jest redukcja oporów tarcia oraz zużycia współpracujących części. Niezależnie od tego dzięki teksturze powierzchniowej możliwa jest praca przy wyższych prędkościach ślizgania i naciskach, niż miałyby to miejsce przy użyciu elementów bez tekstury. W wielu pracach wykazano, że teksturowanie powierzchni zwiększa odporność na zacieranie i zużywanie poprzez fretting, a także jest stosowane wszędzie tam, gdzie mają znaczenie właściwości adhezyjne warstw powierzchniowych (łączenie materiałów, nakładanie powłok, techniki drukarskie, aktywność biologiczna i chemiczna powierzchni itp.) [L. 2÷7].

Obecnie badania nad teksturowaniem koncentrują się na zastosowaniach w precyzyjnych układach łożyskowych, w najważniejszych parach tarcia silników spalinowych i innych obszarach, gdzie teksturowanie jest użyte do wspomaganie takich funkcji, jak odprowadzanie ciepła, zwilżalność, funkcje biologiczne, absorpcyjność itp.

Przedstawiona analiza wykazuje, że osiągnięcie efektów teksturowania następuje przy określonych parametrach pracy pary ślizgowej, a z parametrów teksturowania największe znaczenie mają głębokość i średnica wgłębień

(a właściwie ich stosunek), jak i stopień zaczernienia. Wykazano również, że zaczernienie częściowe może równie skutecznie redukować opory tarcia. nierozwiązane problemy badawcze dotyczą w dalszym ciągu parametrów teksturowania, geometrii pierścienia, jak i parametrów pracy pary tarcia, przy których nastąpi oczekiwana redukcja oporów tarcia. Aktualnym problemem badawczym jest również określenie wpływu teksturowania na własności mechaniczne materiału, a zwłaszcza na jego wytrzymałość zmęczeniową.

LASEROWE WYTWARZANIE TEKSTURY POWIERZCHNIOWEJ

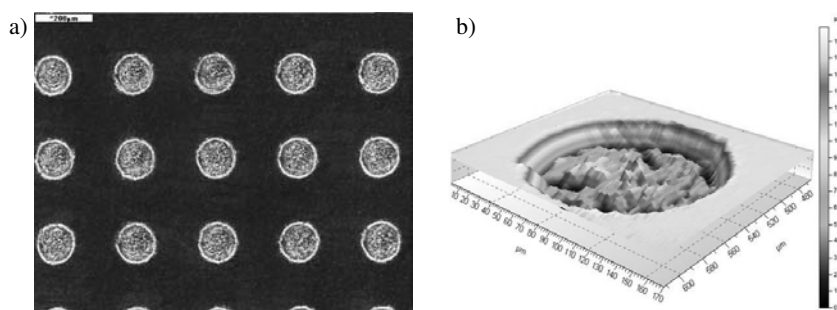
Teksturowanie laserowe należy do grupy technologii nazywanych mikroobróbką laserową.

Przedmiotem badań były tekstury powierzchniowe wykonane technologią laserową na powierzchniach pierścieni z SiC o wymiarach 35×25×7 mm. Teksturowanie powierzchni pierścieni wykonano, wykorzystując laser firmy ESI *Model 5200 μVIA DRILL*. Laser pracuje z trzecią harmoniczną (długość fali $\lambda = 355$ nm).

Technologię teksturowania laserowego oraz parametry charakteryzujące geometryczną teksturę powierzchniową na czołowej powierzchni pierścieni opisano w pracy [L. 7].

Do badań efektów teksturowania laserowego wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy Joel JSM-5400. Przykładowe fotografie przedstawiono na **Rys. 1a i 1b**.

Widoczne na fotografiach efekty erozji laserowej (**Rys. 1a i 1b**) układają się w regularnych odstępach, tworząc zaplanowaną strukturę powierzchni. Widoczne są wzniesienia i wgłębienia, które powstają w wyniku zmian strukturalnych i towarzyszącym im zmianom objętości właściwej w strefach oddziaływania wiązki laserowej.



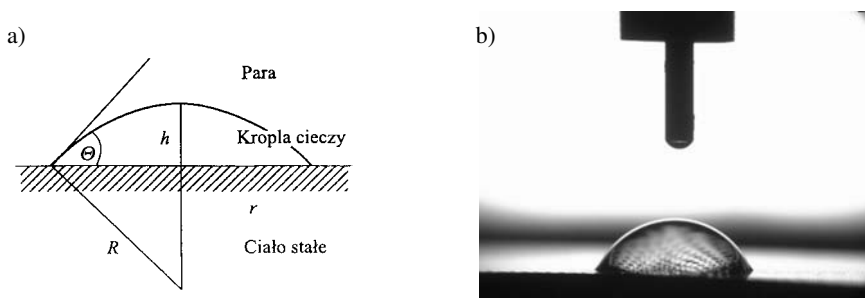
Rys. 1. Widok powierzchni z teksturą na pierścieniu SiC: a) zespół wgłębień tekstury na pierścieniu (stopień zaczernienia 42%, pow. 100×), b) widok 3D pojedynczego mikrowgłębienia (profilometr Form Talysurf PGI 1230)

Fig. 1. View of textured surface on the SiC ring: a) a set of microcavities on the ring (a degree of blackening 42%, magn. ×100), b) 3D view of a single microcavity (Form Talysurf PGI 1230 surface profiler)

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI ADHEZYJNYCH POWIERZCHNI Z TEKSTURĄ

Jedną z najczęściej stosowanych metod oznaczania kąta zwilżania [L. 1] powierzchni materiałów konstrukcyjnych jest metoda opierająca się na geometrii kropli (Rys. 2). Powierzchnia kropli najczęściej ma kształt czaszy i wówczas kąt zwilżania obliczamy z pomiaru wysokości czaszy h i promienia powierzchni styku r . Wysokość czaszy jest określona wzorem $h = R(1 - \cos\Theta)$, a promień styku powierzchni $r = R\sin\Theta$. Z tych zależności otrzymujemy:

$$\Theta = \frac{2h}{r} \quad (1)$$



Rys. 2. Pomiar kąta zwilżania z geometrii kropli (a), widok naniesionej kropli cieczy pomiarowej (b)

Fig. 2. Measurement of the wetting angle from the droplet geometry (a), a view of the deposited droplet of the measurement liquid (b)

Wartość swobodnej energii powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych określa się w sposób pośredni, wykorzystując pomiar kątów zwilżania wybranymi cieczami pomiarowymi. Do pomiaru kąta zwilżania jako cieczy pomiarowych użyto wody destylowanej i diiodometanu (DIM). Do obserwacji kropli i pomiaru kąta zwilżania stosowano mikroskop stereoskopowy wraz z kamerą oraz oprogramowanie MicroScan v 1.3.

Przyjęto następujące wartości stałych swobodnej energii powierzchniowej cieczy pomiarowych oraz jej składowych – polarnej i dyspersyjnej: $\gamma_w = 72,8$ [mJ/m²], $\gamma_w^p = 51,0$ [mJ/m²], $\gamma_w^d = 21,8$ [mJ/m²], $\gamma_d = 50,8$ [mJ/m²], $\gamma_d^p = 2,3$ [mJ/m²], $\gamma_d^d = 48,5$ [mJ/m²]. Ciecz pomiarową наносzono na badaną powierzchnię za pomocą mikropipety o stałej objętości 5 μ l.

Jedną z najczęściej stosowanych metod do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej jest metoda Owensa-Wendta [L. 1, 8], w której przyjęto, że swobodna energia powierzchniowa jest sumą dwóch składowych: dyspersyjnej i polarnej:

$$\gamma_s = \gamma_s^d + \gamma_s^p \quad (2)$$

gdzie:

γ_s^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej,

γ_s^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej.

$$(\gamma_s^d)^{0,5} = \frac{\gamma_d(\cos \Theta_d + 1) - \sqrt{\frac{\gamma_d^p}{\gamma_w^p}} \gamma_w(\cos \Theta_w + 1)}{2 \left(\sqrt{\gamma_d^d} - \sqrt{\gamma_d^p \frac{\gamma_w^d}{\gamma_w^p}} \right)} \quad (3)$$

$$(\gamma_s^p)^{0,5} = \frac{\gamma_w(\cos \Theta_w + 1) - 2\sqrt{\gamma_s^d \gamma_w^d}}{2\sqrt{\gamma_w^p}} \quad (4)$$

gdzie: γ_d – swobodna energia powierzchniowa diiodometanu, γ_d^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu, γ_d^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej diiodometanu, γ_w – swobodna energia powierzchniowa wody, γ_w^d – składowa dyspersyjna swobodnej energii powierzchniowej wody, γ_w^p – składowa polarna swobodnej energii powierzchniowej wody, Θ_d – kąt zwilżania diiodometanem, Θ_w – kąt zwilżania wodą.

W Tabeli 1 przedstawiono zestawienie uzyskanych wyników pomiarów kąta zwilżania.

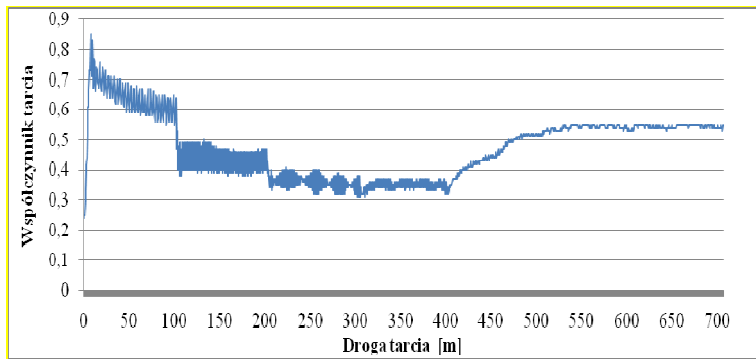
Tabela 1. Zestawienie wyników pomiaru przy dziesięciokrotnym powtórzeniu pomiaru kąta zwilżania każdej próbki

Table 1. Measurement results for tenfold repetition of the wetting angle measurement for each specimen

Nr próbki	Kąt zwilżania								E _p – całkowita energia powierzchniowa (mJ/m)
	Średnia		Ochyl. stand.		Wariancja		Mediana		
	Dla wody	Dla DIM	Dla wody	Dla DIM	Dla wody	Dla DIM	Dla wody	Dla DIM	
1	56,03	38,11	1,41	0,92	2,00	0,86	56,1	38,05	60,6
2	54,12	32,47	2,64	2,91	7,00	8,48	54,85	32,45	63,4
3	67,49	34,44	12,22	3,25	149,2	10,6	69,6	34,55	56,2
4	69,94	32,15	8,06	0,62	65,04	0,38	68,25	32,35	55,9
5	66,72	34,16	4,51	1,45	20,39	2,10	65,85	34,30	56,7
6	70,16	31,66	2,71	1,32	7,35	1,73	69,5	31,45	55,9
7	67,69	26,06	6,04	1,35	36,47	1,89	68,6	26,15	58,8
8	59,52	32,01	4,50	1,63	20,26	2,65	60,75	32,30	60,9
9	67,89	32,95	5,37	1,07	28,83	1,14	67,65	32,65	56,5
10	66,7	34,02	3,24	1,61	10,52	2,60	67,4	34,15	56,8

BADANIA TRIBOLOGICZNE

Badania tribologiczne wykonano na testerze typu trzpień–tarcza. Rolę tarczy spełniały próbki w kształcie pierścieni z SiC z wykonaną teksturą powierzchniową na powierzchni czołowej. Jako trzpienia użyto ściętej kulki $\phi 6,3$ mm ze stali łożyskowej zamocowanej w przegubowym uchwycie. Średnica płaskiej powierzchni uzyskanej po ścięciu kulki wynosiła 4,5 mm. Próby realizowano przy jednokrotnym smarowaniu pierścienia olejem parafinowym oraz przy zmiennych obrotach od 100 do 700 obr/min i zmiennym obciążeniu w zakresie od 4,9 do 39,2 N. Przykładowy przebieg cyklu badawczego przedstawia **Rys. 3**.



Rys. 3. Przykładowy przebieg cyklu badawczego

Fig. 3. Exemplary course of the investigation cycle

Tabela 2. Zestawienie wybranych wyników badań $f = a+b_1d+b_2\gamma+b_3(L-d)+b_4S_p$

Table 2. Selected results of investigations $f = a+b_1d+b_2\gamma+b_3(L-d)+b_4S_p$

Obciążenie [N]	Prędkość ślizgania [m/s]	Rodzaj tarcia	a	b_1 (d)	b_2 (γ)	b_3 (L-d)	b_4 (S_p)	R
24,5	(200)	płynne	0,4439	-0,0017	-0,0072	+0,0013	+0,0039	0,5795
29,4	(200)	płynne	0,8588	-0,0031	-0,0171	+0,034	+0,0093	0,8544
24,5	(600)	mieszane	-0,543	+0,0001	+0,0157	-0,0018	-0,0053	0,8572
29,4	(600)	mieszane	-0,448	-0,0010	+0,0118	-0,0003	-0,0002	0,9062

f – współczynnik tarcia, R – współczynnik korelacji.

W przeprowadzonych badaniach podjęto próbę oceny wpływu parametrów określających właściwości tekstury na opory tarcia w wyróżnionych obszarach pracy węzła tarcia charakteryzujących się występowaniem tarcia płynnego (dwa przypadki) i mieszanego (dwa przypadki). Analizowano następujące charakterystyki tekstury: średnica pojedynczego wgłębienia (d), stopień zaczernienia (S_p), wzajemna odległość krawędzi ($L-d$), swobodna energia powierzchniowa (γ). Wykorzystując program Statistica, przeprowadzono analizę regresji wielorakiej pozwalającą wyznaczyć, która z rozpatrywanych charakterystyk ma najbardziej znaczący wpływ na zmiany wartości współczynnika tarcia. Zestawienie wyników badań przedstawia **Tabela 2**.

PODSUMOWANIE

1. Wartości kątów zwilżania przy zwilżaniu DIM są mniejsze niż przy zwilżaniu wodą, przy czym niepewności pomiarowe dla pomiarów zwilżania wodą mają zdecydowanie wyższe wartości.
2. Badając korelacje pomiędzy parametrami tekstury a właściwościami adhezyjnymi powierzchni, stwierdzono, że najbardziej istotny wpływ na wartość swobodnej energii powierzchniowej ma parametr $L-d$ stanowiący wzajemną odległość krawędzi mikrowgłębień. Wraz ze zwiększaniem tej odległości wartość energii powierzchniowej rośnie.
3. Dla wartości $L-d$ mniejszych niż $80\ \mu\text{m}$ obserwuje się niewielkie zmiany wartości energii powierzchniowej, natomiast po przekroczeniu tej wartości wraz ze wzrostem $L-d$ następuje gwałtowny przyrost energii powierzchniowej.
4. Parametrem badającym funkcję tekstury powierzchniowej, który ma największy wpływ na wartość współczynnika tarcia w obszarze tarcia płynnego i mieszanego, jest wartość swobodnej energii powierzchniowej. W dalszej kolejności istotne znaczenie mają stopień zaczernienia (S_p) oraz wzajemna odległość krawędzi mikrowgłębień ($L-d$).

LITERATURA

1. Rudawska A., Jacniacka E.: Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen-Wendt method. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29 (2009), 451–457.
2. Antoszewski B.: Improvement of the conditions of lubrication friction ties by laser textured lubrication. *Problems of maintenance of sustainable technological systems PNTTE*, Warszawa 2010, 62–75.
3. Wakuda M., Yamauchi Y., Kanazaki S., Yoshireru Yasuda Y.: Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. *Wear*, 254 (2003), 356–363.

4. Volchok A., Halperin G., Etsion I.: The effect of surface regular microtopography on fretting fatigue life. *Wear*, 235 (2002), 509–515.
5. Yu X.Q., He S., Cai R.L.: Frictional characteristics of mechanical seals with a laser textured seal face. *Journal of Materials Processing Technology*, 129 (2002), 463–466.
6. Radek N., Antoszewski B.: Mikroteksturowanie powierzchni ślizgowych par tarcia technologią laserową i elektroerozyjną. *Logistyka*, (2) 2010, 2149–2156.
7. Antoszewski B., Radek N.: Tribologiczne i technologiczne aspekty teksturowania par ślizgowych o powierzchniach płaskich. *Tribologia, teoria i praktyka*, 2 (2008), 25–33.
8. Kłonica M., Kuczmaszewski J.: Analiza energetyczna warstwy wierzchniej po ozonowaniu materiałów konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle lotniczym. Rozdział 4.2 w monografii: „Inżynieria Powierzchni wybrane zagadnienia” pod redakcją Bogdana Antoszewskiego, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2011, s. 171–180.

Summary

Laser surface texturing is currently the most advanced manufacturing technique used to produce microcavities (grooves, dimples, chevrons, and others) on the surface of machine elements, which can be done in a repeated manner, quickly, and economically. The creation of surface texture is primarily aimed at reducing friction coefficients and the wear of contact surfaces. Many works indicate that surface texturing increases seizure resistance and fretting wear resistance, and it is generally used where adhesive properties of surface layers are important (binding materials, applying coatings, printing techniques, layers with biologically and chemically active surfaces, etc.).

The work is an attempt to link, using the options offered by Statistica software package, selected parameters of the topography of textured surface to its surface energy and tribological properties. The results obtained make it possible to state, among others, that the parameters of the surface texture which affect the value of the fluid friction coefficient to the greatest extent are the values of free surface energy, a degree of blackening (S_p), and the distances between edges of microcavities ($L-d$).