

Bogdan ANTOSZEWSKI

Politechnika Świętokrzyska, Centrum Laserowych Technologii Metali

WPŁYW TEKSTURY POWIERZCHNIOWEJ NA SKUTECZNOŚĆ SMAROWANIA PARY ŚLIZGOWEJ

Słowa kluczowe

Smarowanie, teksturowanie laserowe.

Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono niektóre problemy związane ze smarowaniem powierzchni teksturowanej. Zwrócono uwagę, że dla danego obciążenia skuteczność smarowania uzależniona będzie od kształtu, rozmiaru i wzajemnego rozłożenia elementów tekstury. Dla tekstur o siatce prostokątnej i zagłębień o przekroju okrągłym przedstawiono propozycje określania parametrów nierównomierności smarowania. W części eksperymentalnej przedstawiono metodykę laserowego teksturowania, metodykę badań tribologicznych oraz wyniki wstępnych testów.

Wprowadzenie

Współczesna technika stawia coraz to wyższe wymagania w zakresie trwałości i niezawodności maszyn. Węzły tarcia w maszynie należą do tych najważniejszych elementów konstrukcji, które decydują o jakości całej maszyny. Wymagania wysokiej trwałości i niezawodności muszą być spełnione mimo ogarniającej nas zewsząd pogoni za wyprodukowaniem jak największej liczby dóbr jednocześnie przy jak najmniejszym zużyciu energii i materiałów, czyli praktycznie przy ciągłej obniżce kosztów wytwarzania. Stawia to przed projektantami

trudne zadanie opracowania konstrukcji węzła tarcia coraz bardziej doskonałego a jednocześnie taniego. Potencjał zawarty w użytych materiałach szybko się wyczerpuje i dlatego konieczne są działania polegające na wykorzystaniu najnowocześniejszych technologii dających oczekiwane korzystne efekty ekonomiczne i eksploatacyjne. I w tym aspekcie niniejsza praca wpisuje się w nurt opracowań dotyczących zagadnień inżynierii powierzchni [2, 6].

Z jednej strony oferowane są działania umożliwiające nadawanie częściom maszyn cech właściwych pewnym szczególnym materiałom. Dzieje się to drogą nakładania wszelkiego rodzaju powłok, dzięki którym tanie materiały mogą posiadać pewne szczególne cechy powierzchniowe. Ma to znaczenie wówczas, gdy rdzeń materiału ma wystarczającą wytrzymałość, a istotna jest poprawa własności na powierzchni elementu, np. twardości, odporności na ścieranie, odporności na zacieranie itp. Z drugiej strony użyteczność eksploatacyjną części maszyn można poprawić poprzez odpowiednią obróbkę powierzchniową, której celem jest wydobycie i uzbrojenie powierzchni materiału w te właściwości, które są istotne w danym zastosowaniu [7]. Możliwości wykorzystania tego niewyeksplotowanego dotychczas potencjału pojawiają się wraz z rozwojem nowoczesnych technologii, które mogą oddziaływać na materiał skoncentrowanym strumieniem energii [8, 9].

1. Smarowanie powierzchni z teksturą

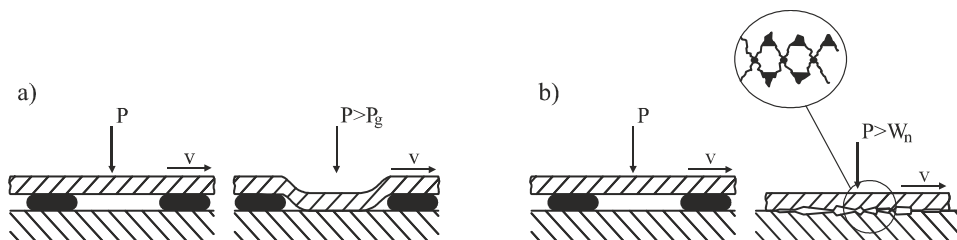
Przy smarowaniu powierzchni płaskich z teksturą mają miejsce różne mechanizmy generowania siły nośnej. Jest to uzależnione od wielu czynników, ale najistotniejsze znaczenie mają parametry pracy pary ślizgowej (prędkość przemieszczania, przenoszone obciążenie) [3, 4].

W ogólnym przypadku mamy tu do czynienia ze smarowaniem hydrostatycznym, hydrodynamicznym i elastohydrodynamicznym, różnice dotyczą źródeł efektów hydrodynamicznych, rozkładów ciśnienia hydrostatycznego w szczelinie jak i formowania się granicznej warstewki smaru. W przypadku formowania warstwy granicznej środek smarny wydobywany z zagłębień chropowatości powierzchni jest rozprowadzany i smaruje powierzchnię współpracy. Rozpatrując ślizgacz przemieszczający się po powierzchni płaskiej można sobie wyobrazić w sytuacji jednokrotnego smarowania ślizgacza, że po przebyciu pewnej drogi zabraknie środka smarnego na wytworzenie warstwy granicznej. Jeśli zaś założymy, że powierzchnia posiada regularne wgłębienia, które mogą być zasobnikami środka smarującego, to powinny być one rozmieszczone w odległościach skorelowanych z pojemnością zasobników środka smarującego.

Proces smarowania uwzględniający zarówno rozmieszczenie, jak i pojemność mikrozbiorniczek smaru (elementów tekstury) nazywamy *smarowaniem z efektem zasobnikowym*. Środek smarny w jednorazowo smarowanej szczelinie rozprowadzany jest na całą powierzchnię i wypełnia wszystkie jej nierówności.

W trakcie pracy ulega destrukcji, wypaleniu bądź też zostaje przemieszczony poza strefę tarcia i nie bierze udziału w smarowaniu. Taki przebieg procesu stwarza konieczność uzupełniania środka smarnego. Może to następować drogą wykorzystywania zgromadzonego smaru w mikrowgłębieniach tworzących teksturę powierzchniową.

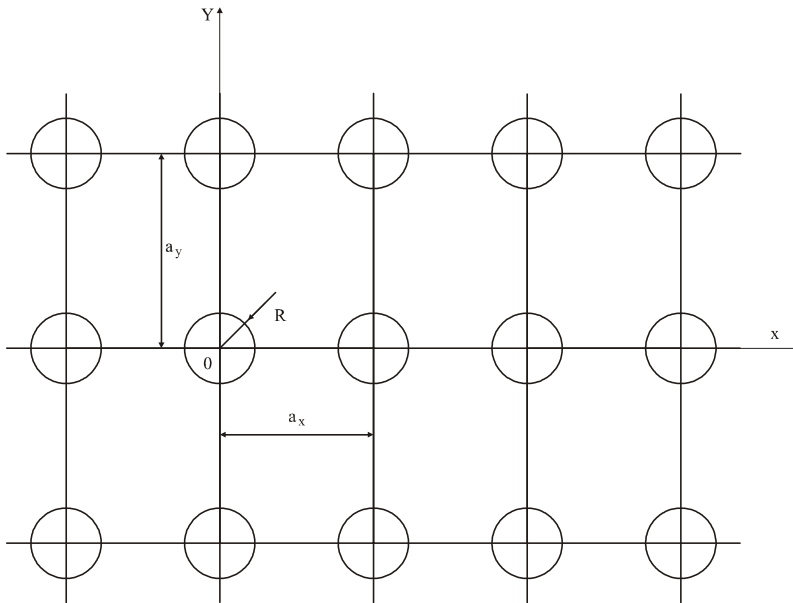
Z drugiej strony należy zauważyć, że istotne znaczenie ma też równomierność smarowania współpracujących powierzchni rozumiana jako równomierność warstwy środka smarującego. W szczególności należy rozróżnić w szczelinach pomiędzy współpracującymi powierzchniami miejsca, w których środek smarny jest (obszary smarowane) od miejsc, w których go nie ma (obszary niesmarowane). W przypadku nierównomiernego smarowania w wyniku działania obciążenia może dochodzić do miejscowego odkształcenia powierzchni, które prowadzi do bezpośredniego styku ciał stałych w obszarach niesmarowanych i idących za tym niekorzystnych procesów tarciovo-żuyciowych (rys. 1a). Nierównomiernie smarowane powierzchnie przyczyniają się również do przejmowania całych obciążeń przez obszary smarowane, co może skutkować przerwaniem warstwy granicznej i doprowadzeniem do bezpośredniego styku współpracujących powierzchni ze wszystkimi konsekwencjami (rys. 1b). Sytuacja ta ma miejsce również w przypadku zbyt małej ilości smaru. Stąd też ważnym problemem jest odpowiednie rozmieszczenie mikrozasobników smaru uwzględniające trajektorię poszczególnych punktów powierzchni współpracującej [10].



Rys. 1. Nierównomierność smarowania i jej skutki: a) odkształcenie i styk w miejscu niesmarowanym, b) niewystarczająca ilość smaru dla danego obciążenia P – obciążenie, P_g – obciążenie graniczne ze względu na odkształcenie, W_n – nośność filmu smarnego

Założmy, że mamy do czynienia z teksturą powierzchniową o prostokątnej siatce zagłębień (rys. 2). Przecięcie tych zagłębień z płaszczyzną tworzy koła o promieniu R . Odległości kolumn w siatce wynoszą a_x i a_y . Wobec tego każde zagłębienie identyfikuje para liczb (k, m) odpowiadająca przecięciu k -tej kolumny z m -tym wierszem. Współrzędne środka zagłębień będą następujące:

$$x_{k,m} = ka_x, \quad y_{k,m} = ma_y \quad (1)$$



Rys. 2. Tekstura powierzchniowa z prostokątną siatką zagłębień

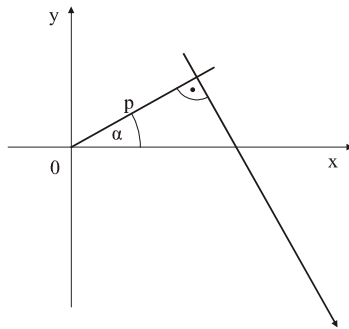
Jeśli dalej założymy, że po powierzchni z teksturą przemieszcza się powierzchnia gładka, to każdy jej punkt przemierza pewną trajektorię. Rozpatrujemy tylko przypadek, gdy trajektorie są prostymi, co ma miejsce np. w przypadku współpracy tłoka z cylindrem silnika tłokowego. Z punktu widzenia smarowania interesuje nas wzajemne usytuowanie trajektorii i zagłębień tekstury powierzchniowej. Zakładamy, że zagłębienia to miejsca obfite (wypełnione) środkiem smarującym i stąd jeśli trajektoria przemieszcza się nad takim zagłębieniem, to sytuację taką kwalifikujemy jako korzystną ze względu na smarowanie. Trajektorie, które nie przebiegają nad zagłębieniami, nie biorą udziału w rozprowadzaniu smaru i tę sytuację kwalifikujemy jako niekorzystną ze względu na smarowanie. Zatem należy tak zaplanować ułożenie siatki tekstury, aby trajektorie przebiegały nad jak największą liczbą zagłębień. Zauważmy, że poprzez zmianę kąta α pochylenia wektora prędkości względem osi y siatki tekstury można zapewnić, że poszczególne trajektorie będą przebiegały częściej nad zagłębieniami. Ustalając parametry siatki tekstury jak i przyjmując pewną długość trajektorii L , można wyliczyć dla określonego kąta α i dla pęku trajektorii oddalonych o Δp liczbę zagłębień, nad którymi przechodzi poszczególna trajektorja (rys. 4).

Zapiszmy równanie trajektorii w następującej normalnej postaci:

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha - p = 0 \quad (2)$$

gdzie p jest odległością prostej od punktu $(0, 0)$, a α jej kątem nachylenia do osi y (rys. 3). Odległość d_k prostej od dowolnego punktu (x_k, y_k) wyraża się wzorem:

$$d_x = |x_k \cos \alpha + y_k \sin \alpha - p| \quad (3)$$

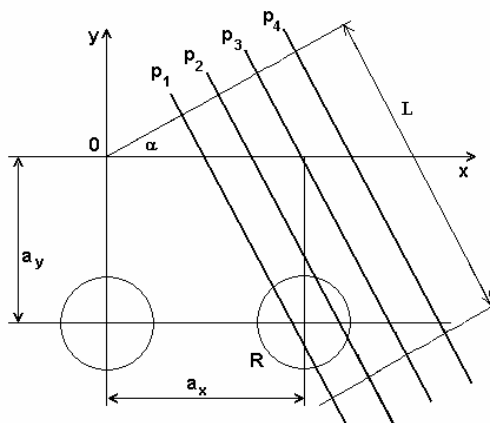


Rys. 3. Trajektoria ruchu jednego punktu po powierzchni nieruchomej

Pojedyncza trajektoria przebiega nad zagłębieniem (k, m) , jeżeli jej odległość od punktu (kb_x, mb_y) jest mniejsza niż R (R – promień zagłębienia), a więc kiedy

$$|kb_x \cos \alpha + mb_y \sin \alpha - p| \leq R \quad (4)$$

Przy analizie smarowania powierzchni leżącej na konkretnej trajektorii należy sprawdzić wszystkie węzły (k, m) i zliczyć te, dla których nierówność (4) jest spełniona. Tę liczbę przecięć trajektorii z wszystkimi węzłami oznaczamy przez N .



Rys. 4. Pęk trajektorii

Takie analizy mają sens dla konkretnych danych dotyczących obszaru, na którym interesuje nas równomierność smarowania. Przykładowy pęk trajektorii przedstawia rysunek 4. Rozważmy pęk trajektorii $T = 200$ odległych o $\Delta p = 0,2$ i o długości $30 L$, który przemieszcza się nad powierzchnią z teksturą o siatce prostokątnej $a_x = 1$ i $a_y = 5$ i zagłębieniami o promieniu $R = 1$. Założono, że dla siatki prostokątnej reprezentatywna jest przekątna węzłów siatki i wobec tego zdefiniowano długości L jako wielokrotność M długości przekątnej siatki zagłębień (w rozpatrywanym przykładzie założono $M < 10$).

$$L = M \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \quad (5)$$

Dla kąta $\alpha = 0$ uzyskamy wynik, że spośród 200 rozpatrywanych trajektorii tylko 80 przechodzi nad zagłębieniami każda 36 razy, natomiast 120 trajektorii nie przechodzi w ogóle nad zagłębieniami i są to trajektorie „suche” (niesmarowane). Dla kąta $\alpha = 10^\circ$ mamy wynik, że każda trajektoria jest smarowana i to co najmniej 13 razy. Niektóre trajektorie przechodzą nad zagłębieniami 15 razy.

Idealem byłoby, aby wszystkie trajektorie miały tę samą liczbę równomiernie rozłożonych przecięć ze smarującymi zagłębieniami. Jednak dla wszystkich kątów α istnieją różnice między poszczególnymi trajektoriami i liczby N_i są różne. Liczby przecięć rozmieszczone są bardzo nieregularnie. Można zaproponować następującą miarę nierównomierności smarowania:

$$Q_2 = \sum_{p=1}^T (N_{p+1} - N_p)^2 \quad (6)$$

Wówczas dla $[N_1 = 1, N_2 = 1, N_3 = 3]$ otrzymujemy $Q_2 = 2$, a dla $[N_1 = 1, N_2 = 2, N_3 = 3]$ otrzymujemy $Q_2 = 4$, co lepiej odzwierciedla stan faktyczny. Im większa nierównomierność, tym gorsze smarowanie, co odzwierciedla wyżej przedstawioną sytuację. Można przyjmować inne miary nierównomierności, ale miara (6) ze względu na swoją prostotę ma wiele zalet.

Wartość Q_2 zależy od długości L , na której badamy trajektorie. Długość ta była wyrażona jako wielokrotność długości przekątnej siatki zagłębień

$$L = M \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

W przybliżeniu Q_2 jest proporcjonalne do M^2 . Aby znormalizować tę miarę nierównomierności, dzielimy Q_2 przez M^2 i otrzymujemy znormalizowaną nierównomierność D_T , która jest średnią liczbą przecięć na długości jednej przekątnej.

$$D_T = \frac{1}{M^2} \sum_{p=1}^T (N_{p+1} - N_p)^2 \quad (7)$$

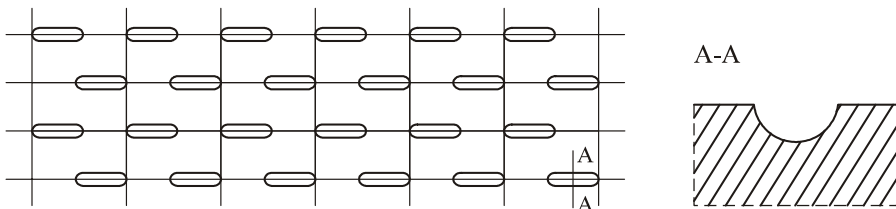
Dla $M = 30$ i wyżej wymienionych danych otrzymujemy następującą tablicę wartości znormalizowanej nierównomierności D_T .

Tabela 1. Nierównomierność DT dla kątów od $\alpha = 0^\circ$ do $\alpha = 90^\circ$ [10]

		+1°	+2°	+3°	+4°	+5°	+6°	+7°	+8°	+9°
$\alpha = 0^\circ$	18,72	0,13	0,28	0,14	0,10	0,40	0,51	0,06	0,06	0,21
$\alpha = 10^\circ$	0,11	0,47	0,14	1,10	4,55	0,09	0,15	0,61	0,40	0,27
$\alpha = 20^\circ$	1,22	0,37	0,10	0,10	0,13	0,29	0,26	0,77	0,42	0,11
$\alpha = 30^\circ$	0,05	2,44	1,70	0,21	0,13	2,60	0,17	0,08	0,13	0,12
$\alpha = 40^\circ$	0,20	0,12	2,43	0,07	0,18	9,29	0,17	0,60	0,32	0,12
$\alpha = 50^\circ$	0,04	0,21	0,23	0,11	2,59	0,13	0,36	0,28	0,78	0,80
$\alpha = 60^\circ$	0,24	0,25	0,95	0,09	0,08	0,53	0,07	0,13	0,09	1,22
$\alpha = 70^\circ$	1,18	0,23	0,11	0,46	1,31	0,06	4,23	0,21	0,13	0,40
$\alpha = 80^\circ$	0,07	0,11	0,13	0,21	0,36	0,07	0,18	0,11	0,14	0,30
$\alpha = 90^\circ$	18,75									

Im mniejsza nierównomierność D_T , tym lepsze jest smarowanie powierzchni. Dla $\alpha = 0^\circ$ do $\alpha = 90^\circ$ mamy do czynienia z najwyższymi wartościami D_T i tu sytuacja jest wyjątkowo niekorzystna. Najlepszą jakość smarowania uzyskuje się dla kątów α równych 15, 30, 37, ... stopni, dla których nierównomierność jest mniejsza niż 0,1. Dla tych kątów wszystkie trajektorie napotykać prawie taką samą liczbę zagłębień. Dla kilku kierunków D_T osiąga wartości bardzo duże, co oznacza, że smarowanie jest wtedy złe. Wyjątkowo korzystny układ otrzymuje się dla niepokazanych tutaj kątów od $\alpha = 36,1^\circ$ do $\alpha = 37^\circ$, dla których nierównomierność D_T jest równa od $D_T = 0,04$ do $D_T = 0,16$. Należy podkreślić, że podane w tabeli 1 wartości podlegają dużym wahaniom przy zmianach długości pomiarowej L i parametrów siatki tekstury.

Problemy niejednorodności smarowania przy smarowaniu z efektem zasobnikowym mają zupełnie inny wymiar, jeśli rozpatruje się teksturę posiadającą pojedyncze elementy w postaci rowków ułożonych prostopadłe i naprzemiennie do trajektorii przemieszczających się punktów współpracującej powierzchni (rys. 5).



Rys. 5. Tekstura powierzchniowa z tworzącymi ją elementami w kształcie rowków

W tym przypadku wartość kąta α będzie miała zdecydowanie mniejszy wpływ na nierównomierność smarowania. Cecha ta decyduje o popularności tego typu tekstury. O wyborze kształtu pojedynczego elementu tekstury decydują względy technologiczne, a także trwałościowe i wytrzymałościowe. Wpływ rodzaju tekstury na trwałość i wytrzymałość pary ślizgowej nie jest jeszcze wyczerpująco zbadany. W aktualnie stosowanych rozwiązaniach technicznych (technika motoryzacyjna) wykorzystywany jest efekt „dodatkowych” rewersów wynikających z poprawy warunków smarowania powierzchni z teksturą [5].

2. Laserowe wytwarzanie powierzchni z teksturą

Teksturowanie laserowe należy do grupy technologii nazywanych mikroobróbką laserową [9, 12]. Są to procesy obróbki ubytkowej, przy której obszary usuwanego materiału mają wymiary w skali mikrometrów lub milimetrów, a do usuwania materiału używana jest energia wiązki laserowej. Mikroobróbka laserowa jest metodą, z powodzeniem stosowaną wówczas, gdy wymagana jest wysoka dokładność wymiarowa i w przypadku materiałów kłopotliwych dla technologii mechanicznych. Teksturowanie laserowe polega na nadawaniu powierzchni obrabianego materiału pożądanej struktury geometrycznej i/lub rozkładu właściwości [1, 2].

Wiązka laserowa jako fala elektromagnetyczna wykazująca koherencję, czyli spójność czasową i przestrzenną, jest nośnikiem pozwalającym na uzyskiwanie wysokiej koncentracji energii pod względem obszaru i czasu oddziaływania na materiał obrabiany. W laserowej mikroobróbce obszar bieżącego oddziaływania na materiał jest określony wielkością plamki laserowej lub maski, która przepuszcza tylko pożądaną część wiązki. W przypadku gdy do obróbki potrzebna jest wysoka powierzchniowa gęstość energii, stosuje się skupianie wiązki przy użyciu elementów optycznych. Wiązka laserowa o średnicy D i długości fali λ teoretycznie może być skupiona w ognisku, którego minimalna średnica jest zależna od występowania zjawiska dyfrakcji [9] i jest opisywana wzorem:

$$d = 2,44 \frac{f}{D} \lambda \quad (8)$$

gdzie: f – ogniskowa zastosowanego elementu skupiającego (soczewki lub zwierciadła).

Długość λ fali promieniowania jest istotna nie tylko ze względu na możliwość osiągnięcia wysokiego skupienia wiązki, ale również ze względu na zdolność absorbowania energii promieniowania przez materiał. W mikroobróbce laserowej szczególnie istotny jest aspekt czasu impulsu wiązki, bowiem

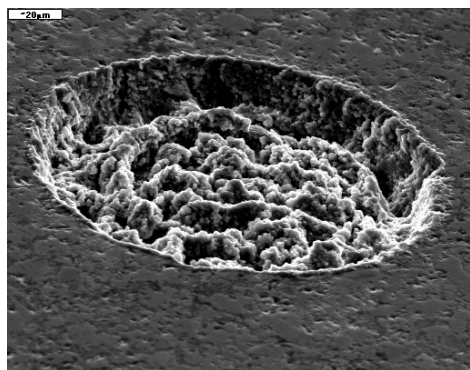
w zależności od intensywności promieniowania i czasu ekspozycji można wykorzystywać różne mechanizmy oddziaływania na materiał. Wynika to ze skończonych czasów reakcji elektronów i sieci atomowej materiału na fotony. Impulsy o długości większej o 1 ns nazywane są impulsami długimi. W przypadku czasu od 1 ps do 1 ns impulsy nazywa się krótkimi, a przy czasie trwania mniejszym od 1 ps mówi się o impulsach ultrakrótkich. Przy wysokiej intensywności promieniowania, impulsach o krótkim czasie i dużej energii, występuje zjawisko absorpcji wielofotonowej, czyli jednoczesnego przekazania energii wielu fotonów jednemu elektronowi. Usuwanie materiału z obszaru oddziaływania wiązki występuje przed jego termicznym topnieniem i parowaniem. Proces taki jest nazywany topnieniem nietermicznym. Do jego uzyskania konieczna jest dostateczna gęstość powierzchniowa energii wiązki laserowej. W przypadku niedostatecznej gęstości powierzchniowej energii następuje relatywnie wolniejsze podnoszenie temperatury materiału i słabnięcie wiązań pod wpływem drgań cieplnych, które może doprowadzić do termicznego topnienia i odparowania materiału. Od długości trwania impulsów laserowych zależy wielkość strefy wpływu ciepła [9].

Obróbka impulsami długimi pozostawia wyraźne ślady przetopienia i zmiany na skutek oddziaływania ciepła. Natomiast ablacja wywoływana impulsami pikosekundowymi i femtosekundowymi jest nazywana ablacją zimną (ang. *the cold ablation*), ponieważ w materiale nie obserwuje się strefy wpływu ciepła w jej tradycyjnym rozumieniu [12]. Z punktu widzenia zastosowania teksturowania powierzchni istotne znaczenie ma jednoznaczna identyfikacja wytworzonych tekstur oraz jej podstawowe właściwości fizyczne. Przedmiotem badań były tekstury powierzchniowe wykonane technologią laserową na powierzchniach próbek w postaci pierścieni z SiC. Teksturowanie powierzchni pierścieni wykonano, wykorzystując laser firmy ESI Model 5200 $\mu\text{VIA DRILL}$. Jest to laser Nd:YAG pompowany diodowo o maksymalnej mocy wiązki 2 W, emitujący promieniowanie nadfioletowe o długości fali 355 nm. Pozostałe istotne parametry pracy lasera to czas trwania impulsu 30 ns dla 3 kHz, częstotliwość $100\text{ Hz} \div 20\text{ kHz}$. Laser wyposażony jest w optykę skanerową o polu roboczym $533\text{ mm} \times 635\text{ mm}$. Wgłębienia wykonywano, wykorzystując standardowe oprogramowanie skanera. Procedura teksturowania obejmowała dwa etapy, pierwszy – erodowanie punktowe po trajektorii spirali i drugi – profilowanie otworu wiązką o średnicy odpowiadającej zadanej średnicy wgłębienia. W tabeli 2 przedstawiono parametry uzyskanych tekstur, a na rysunku 6 ich przykładowy widok uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego.

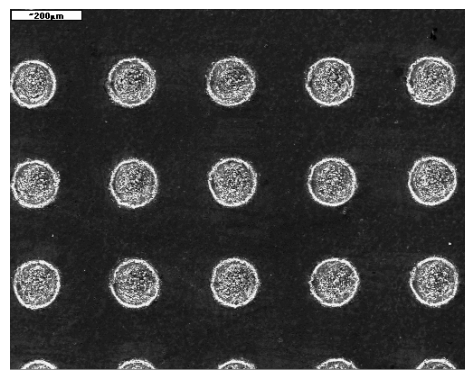
Tabela 2. Parametry tekstury powierzchni pierścieni

Nr próbki	Średnica wgłębienia d [μm]	Odległość między środkami osi symetrii wgłębień a [μm]	Głębokość zagłębień [μm]	S_p Stopień zaczerwienienia [%]	Wzajemna odległość krawędzi wgłębień $a - d$ [μm]
1	78	162	13	18,2	84
2	134	279	13	17,9	145
3	78	106	13	42,5	28
4	134	183	13	41,8	49
5	150	256	13	27,4	106
6	70	119	13	27,1	49
7	102	128	13	49,9	26
8	102	233	13	15,1	131
9	102	174	13	26,9	72
10	102	174	13	26,9	72

a)



b)

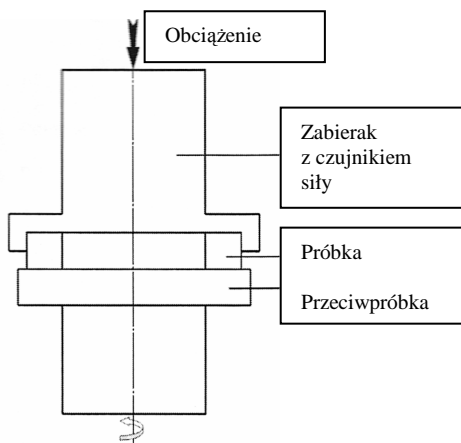


Rys. 6. Widok powierzchni z teksturą na pierścieniu SiC: a) pojedyncze wgłębienia na powierzchni pierścienia (pow. 500 \times), b) zespół wgłębień tekstury na pierścieniu (stopień zaczerwienienia 42%, pow. 100 \times)

3. Badania tribologiczne

Obliczone wcześniej wskaźniki nierównomierności smarowania można określić dla innych trajektorii między innymi dla trajektorii stanowiących okrąg. Szczegóły obliczeń wskaźników nierównomierności smarowania dla takich trajektorii wykraczają poza ramy niniejszego opracowania. Badania eksperymentalne realizowano na modelu łożyska wzdłużnego, gdzie mamy do czynienia z trajektorią po okręgu.

Do badań wykorzystano zmodyfikowany tester tribologiczny T-01M, w którym zamiast typowego trzpienia zainstalowano odpowiednio przygotowany pierścień stanowiący próbkę do badań. Pierścień ten dociskany jest poprzez kulkę (łożysko oporowe) do drugiego o identycznych rozmiarach pierścienia stanowiącego przeciwpróbkę i zamontowanego w obracającej się obudowie. Zmiany siły tarcia rejestrowano za pomocą czujnika siły zamontowanego na ramieniu zabieraka. Zastosowane rozwiązanie poszerza możliwości badawcze testera, zapewniając możliwość badania tarcia przy styku pierścieniowym występującym w wielu układach rzeczywistych (łożysko wzdłużne, uszczelnienie czołowe). Istotne jest również to, że w układzie tym możliwe jest zwilżanie w sposób ciągły wewnętrznej krawędzi styku pierścieni czynnikiem smarującym.



Rys. 7. Schemat pary trącej zmodyfikowanego testera tribologicznego T-01M

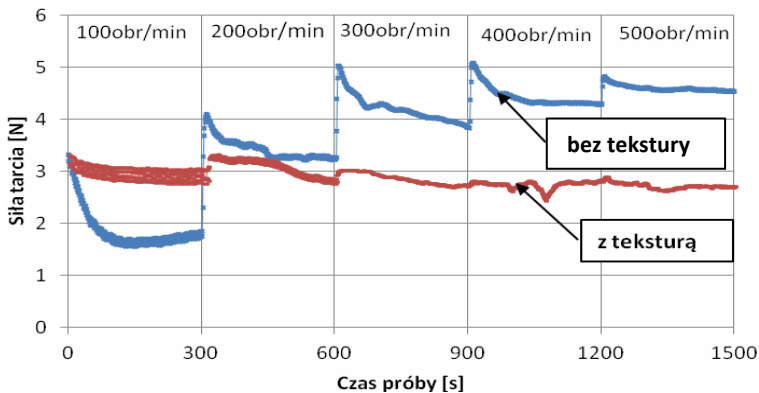
W trakcie badań wykorzystuje się pełen zakres możliwości zmian parametrów roboczych testera:

- prędkość obrotowa zmieniana stopniowo od 100 do 500 obr/min,
- obciążenie węzła tarcia siłą normalną od 4,9 do 39,2 N.

Próbki do badań (próbki z powierzchnią teksturowaną, przeciwpróbki) stanowiły pierścienie o wymiarach $\varnothing 37 \times \varnothing 26,5 \times 8$ mm wykonane ze spiekanego SiC – były to oryginalne, handlowe, atestowane pierścienie do uszczelniania czołowego.

W badaniach w pierwszej kolejności przeprowadzono eksperyment polegający na zidentyfikowaniu różnic w przebiegach siły tarcia dla próbek z teksturą i bez tekstury. Stosowano smarowanie olejem parafinowym, wypełniając nim przestrzeń utworzoną przez wewnętrzne ścianki pierścieni. W dalszych

systematycznych badaniach planuje się przeprowadzenie eksperymentu planowanego w oparciu o program statyczny, zdeterminowany, wieloczynnikowy, rotabilny z powtórzeniami PS/DS- λ , co umożliwi określenie relacji pomiędzy parametrami tekstury, obciążenia a wartością siły tarcia (rodzaj tarcia).



Rys. 8. Przebieg zmienności siły tarcia w funkcji czasu próby przy zmiennych prędkościach obrotowych, obciążeniu 19,6 N dla próbki z SiC bez tekstury i z teksturą 3 (tabela 2)

Widoczne na rysunku 8 przebiegi wskazują, że dla próbek z teksturą wraz ze zwiększaniem prędkości ślizgania obserwuje się początkowo (dla prędkości 200 obr/min) niewielki wzrost wartości siły tarcia a następnie dla wyższych prędkości siła tarcia systematycznie maleje. Dla wyższych obciążeń obserwowano podobne relacje, z tym że tendencja do zmniejszania wartości siły tarcia następowała przy wyższych prędkościach obrotowych. Przebiegi dla próbki bez tekstury niezależnie od obciążenia mają taki sam charakter ze zwiększaniem prędkości obrotowej wzrasta wartość siły tarcia. Powyższe obserwacje dowodzą, że obecność tekstury poprawia skuteczność smarowania, dzięki czemu para ślizgowa jest zdolna do przenoszenia większych obciążeń jednocześnie przy niższych wartościach siły tarcia. Efekt ten występuje tym bardziej wyraźniej, im wyższa jest prędkość ślizgania. Taka zależność wskazuje, że występują tu zjawiska hydrodynamiczne, które wyraźnie ujawniają się przy wyższych prędkościach ślizgania.

Podsumowanie

Przedstawione analizy i badania wykazały, że tekstura powierzchniowa poprawia skuteczność smarowania zwłaszcza przy wyższych obciążeniach i prędkościach ślizgania. Efekt końcowy uzależniony jest od rozmiarów, kształtu oraz wzajemnego usytuowania pojedynczych elementów tekstury, a także od parametrów obciążenia pary ślizgowej. Zaobserwowany charakter zmian wartości siły

tarcia wraz ze wzrostem prędkości ślizgania wskazuje na rozwój zjawisk hydrodynamicznych skutkujących poprawą warunków smarowania i obniżeniem wartości siły tarcia. Relacje pomiędzy parametrami tekstury a trajektorią poszczególnych punktów powierzchni współpracującej mogą być charakteryzowane zaproponowanymi wskaźnikami nierównomierności smarowania. Analiza tych wskaźników wskazuje, że dla rozpatrywanej przykładowej tekstury najlepszą jakością smarowania uzyskuje się dla kątów α równych 15, 30, 37 stopni, dla których wskaźnik nierównomierności jest mniejszy od 0,1. Z przeprowadzonych badań tribologicznych wynika, że dla zbadanej tekstury (tekstura nr 3 wg tabeli 2) zaobserwowano przy obciążeniach z zakresu 4,9 do 19,6 N zmniejszenie siły tarcia w odniesieniu do pierścienia bez tekstury po przekroczeniu prędkości 200 obr/min. Przy wyższych obciążeniach następowało to przy przekroczeniu prędkości 300 obr/min. Wartość zmniejszenia siły tarcia w odniesieniu do pierścienia bez tekstury wynosiła od 12 do 40% i osiągała maksymalną wartość dla prędkości 500 obr/min. Eksperymentalne potwierdzenie związków oporów tarcia z zaproponowanymi wskaźnikami nierównomierności smarowania będzie możliwe po przeprowadzeniu dalszych badań.

Bibliografia

1. Antoszewski B.: Własności laserowo i plazmowo modyfikowanych ślizgowych węzłów tarcia na przykładzie uszczelnień czołowych. Monografia nr 17, Kielce 1999.
2. Erdemir A.: Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication – *Tribology International* 38 (2005) 249–256.
3. Etsion I.: State of the Art in Laser Surface Texturing” – *Transaction of the ASME* January 2005 Vol. 127.
4. Etsion I., A laser surface textured hydrostatic mechanical seal Sealing technology March 2003.
5. 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* 38(2005) 219–225.
6. McGeough J.A., Rasmussen H.: A theoretical model of electrodischarge texturing, *Journal of Materials Processing Technology* 68 (1997) 172–178.
7. Volchok A., Halperin G., Etsion I.: The effect of surface regular microtopography on fretting fatigue life – *Wear* 235 (2002) 509–515.
8. Ryk G., Klingerman Y., Etsion I.: Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components *Tribology Transactions* Vol 45 2002 4, 444–449.
9. Steen W.M.: *Laser Material Processing*. Springer 2003.

10. Wesolowski Z.: The non-uniformity of lubrication of a surface with microstructure IX International Technical Systems Degradation Conference 7–10.April 2010 Liptovsky Mikulas Slovakia pp. 139–141.
11. 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.
12. Powel P.M.: Laser-Based Micromachining Gets Practical. Photonics Spectra, July 2003, 70.

Recenzent:

Henryk CZARNECKI

The influence of a surface texture on the effectiveness of lubricating the sliding pair

Key words

Lubrication, laser texturing

Summary

The paper presents some of the problems associated with the lubrication of laser textured surface. It was noted that the lubrication effect on the load depends on the shape, size and texture of the mutual distribution of elements. For textures with a square network distribution and circular profile of depressions in the grid, the proposed methods determine the parameters of uneven lubrication. The experimental part presents the methodology of laser texturing, tribological research and the results of preliminary tests.