

Sławomir WOŚ*, **Waldemar KOSZELA***, **Paweł PAWLUS***,
Jarosław SEP*

WPLYW WYBRANYCH PARAMETRÓW BADAŃ NA WSPÓŁCZYNNIK TARCIA W PRZYPADKU OBUSTRONNEGO TEKSTUROWANIA POWIERZCHNI ŚLIZGOWYCH

THE INFLUENCE OF RESEARCH PARAMETERS ON FRICTION COEFFICIENTS FOR THE TEXTURING OF BOTH SLIDING SURFACES

Słowa kluczowe:

kieszenie smarowe, obróbka strumieniowo-ścierna, obustronne teksturowanie

Key words:

oil pockets, abrasive jet machining, both surfaces textured

Streszczenie

Badania doświadczalne zostały przeprowadzone w celu określenia wpływu teksturowania obu powierzchni kontaktujących się elementów węzła tarcowego na współczynnik tarcia. Próbkę, na których wykonano kieszenie smarowe wykonane

* Politechnika Rzeszowska, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, al. Powstańców Warszawy 8,35-959 Rzeszów, Polska, tel. (17) 865 15 74, e-mail: wosslawomir@prz.edu.pl.

zostały ze stali 42CrMo4. Przedmiotem badań były powierzchnie niezawierające kieszeni smarowych oraz jednostronnie i obustronnie teksturowane.

WPROWADZENIE

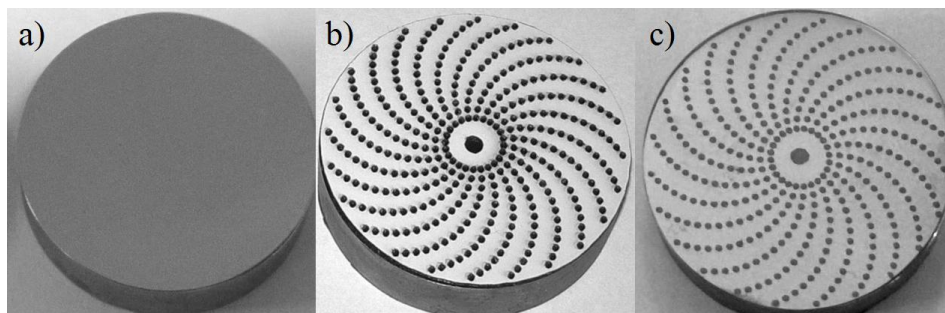
Jedną z metod służących redukcji sił tarcia oraz stabilizacji warunków panujących w węźle tarciovym jest modyfikacja struktury geometrycznej kontaktujących się elementów poprzez wykonywanie kieszeni smarowych. Obecnie najczęściej stosowaną teksturą jest honowana powierzchnia płasko-wierzchołkowa tulei cylindrowych. Jej skuteczność dotyczącą redukcji sił tarcia oraz zmniejszenia ryzyka zatarcia została udowodniona w licznych publikacjach [L. 1–2]. Poszukiwanie alternatywnego rozwiązania zaowocowało opracowaniem powierzchni ślizgowych, na których wykonywane są wgłębienia. Obecnie kieszenie smarowe wykonywane są z wykorzystaniem różnych technologii, spośród których najpopularniejsze są obróbka laserem [L. 3] oraz nagniatanie [L. 4–5]. Ponadto do kształtowania kieszeni smarowych wykorzystywane są również trawienie elektrochemiczne, obróbka elektroerozyjna [L. 6] oraz obróbka strumieniowo-ścierna [L. 7–9]. Kieszenie smarowe pozytywnie wpływają na współpracę węzła ciernego przez zwiększenie pojemności olejowej powierzchni oraz stanowią miejsce odkładania się produktów zużycia mogących zwiększać zużywanie się powierzchni trących [L. 5]. Obecność kieszeni smarowych na współpracujących powierzchniach stwarza również możliwość zapewnienia lepszych warunków pracy współpracujących powierzchni. Badania przedstawione w publikacji [L. 9] pokazują, że możliwe jest uzyskanie dla powierzchni teksturowanej czterokrotnie mniejszego zapotrzebowania na olej niż w przypadku powierzchni nieteksturowanej, zapewniając stabilne warunki pracy. W publikacji [L. 8], wykazany został negatywny wpływ stosowania teksturowania obu powierzchni kontaktujących się elementów węzła tarciovego. W skrajnym przypadku zwiększenie siły tarcia w stosunku do jednostronnego teksturowania wynosiło nawet 70%. Wykazano również, że nie ma istotnego znaczenia, czy kieszenie smarowe są kształtowane na ruchomym bądź statycznym elemencie węzła arciowego.

W celu uzupełnienia uzyskanych wyników badań przedstawionych w publikacji [L. 8] wykonywano kieszenie smarowe o stopniu pokrycia 17% w szyku spiralnym, których pozytywny wpływ został wcześniej potwierdzony [L. 7, 9].

OBIEKTY BADAWCZE

Badania przeprowadzono na stanowisku wyposażonym w tester tribologiczny T-11 typu: trzpień-tarcza. Podczas badań mierzono siłę tarcia w funkcji czasu za pomocą czujnika tensometrycznego firmy Hottinger typu S2 o zakresie pomiarowym 0÷50 N. Do pomiaru prędkości obrotowej wrzeciona zastosowano

indukcyjny, zbliżeniowy przetwornik położenia typu SCID-1 ZNV. Badania obejmowały teksturowane i nieteksturowane tarcze wykonane ze stali 42CrMo4 o twardości 50HRC i średnicy 25,4 mm (**Rys. 1**). Zastosowane skojarzenie oraz materiały odwzorowują węzeł cierny, jakim jest skojarzenie prowadnic ślizgowych. Zmniejszenie współczynnika tarcia w tych konstrukcjach umożliwiłoby ich szersze stosowanie. Ponadto strumieniowo-ścierna metoda kształtowania kieszeni smarowych nie zwiększałaby w znaczący sposób kosztów obróbki prowadnic.

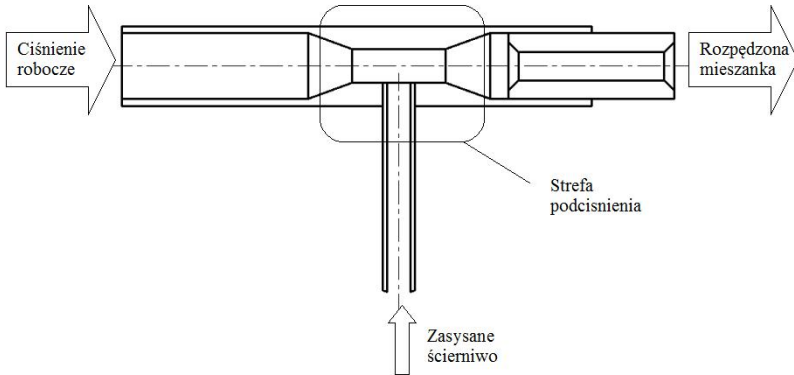


Rys. 1. Kolejność obróbki tarcz, a) tarcza nieteksturowana, b) tarcza wraz z naklejoną maskownicą przed obróbką strumieniowo-ścierną, c) tarcza po obróbce

Fig. 1. Order of discs machining, a) untextured disc, b) disc with glued laser cut mask before abrasive jet machining, c) disc after machining

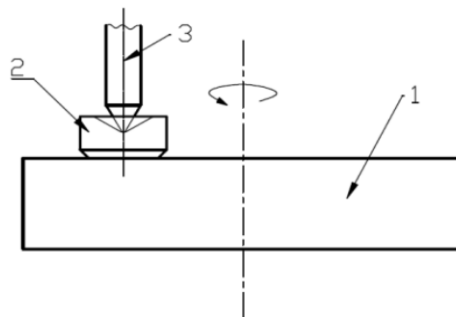
Zarówno tarcze nieteksturowane, jak i teksturowane poddano polerowaniu w celu uzyskania małej wysokości nierówności (R_a 0,05-0,07 μm), następnie tarcze przeznaczone do teksturowania podlegały obróbce strumieniowo-ściernej w celu wykonania kieszeni smarowych. Do obróbki wykorzystano elektrokorund szlachetny o granulacji 125–150 μm . Elektrokorund był rozpędzany przez sprężone powietrze pod ciśnieniem roboczym 0,6 MPa i rozpylany przez dyszę o średnicy wewnętrznej 6 mm. Schemat urządzenia inżektorowego do obróbki strumieniowo-ściernej przedstawiono na **Rysunku 2**.

Powierzchnia badanych tarcz, która nie miała być poddawana obróbce została osłonięta za pomocą samoprzylepnych maskownic wykonanych z dwuwarstwowej folii grawerskiej zbrojonej włóknem szklanym (**Rys. 1b**). Spiralny zyk kieszeni smarowych był odwzorowaniem maskownicy (**Rys. 1c**) wykonanej za pomocą plotera laserowego typu GCC LaserPro L-25 z laserem CO₂ o mocy wiązki tnącej 25 W. Podczas obróbki uzyskano teksturę złożoną z kieszeni smarowych o średnicy 500 μm i głębokości 10 μm . Stopień pokrycia powierzchni przez kieszenie smarowe wynosił 17%. Aby zapewnić styk rozłożony i możliwość wykonania kieszeni smarowych również na powierzchni przeciwpróbkki, zastosowano rozwiązanie wykorzystane w poprzednich badaniach **L. 7–9]** (**Rys. 3**).



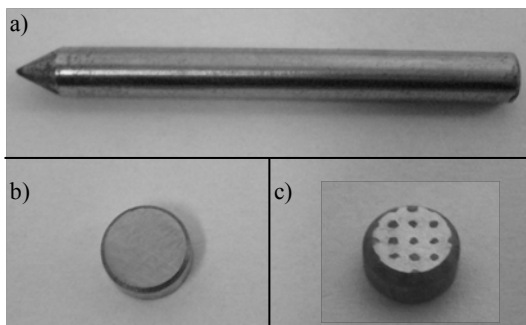
Rys. 2. Schemat działania urządzenia inżektorowego wykorzystanego do obróbki strumieniowo ścierniwo

Fig. 2. Schematic of device used for abrasive jet machining



Rys. 3. Schemat zastosowanego styku rozłożonego: 1) tarcza, 2) przeciwpróbka, 3) trzpień [L. 7–9]

Fig. 3. Schematic of used conformal contact during tests: 1) disc, 2) counter specimen, 3) pin [L. 7–9]



Rys. 4. Stosowane przeciwpróbki: a) trzpień, b) przeciwpróbka nieteksturowana, c) przeciwpróbka teksturowana

Fig. 4. Used counter specimen: a) pin, b) untextured sample, c) textured sample

Wahliwie zamontowana na trzpieniu przeciwpróbka w postaci tarczy o średnicy 5 mm oraz wykonaną fazą 0,5 mm x 45° również była polerowana do uzyskania chropowatości Ra 0,05-0,07 μm .

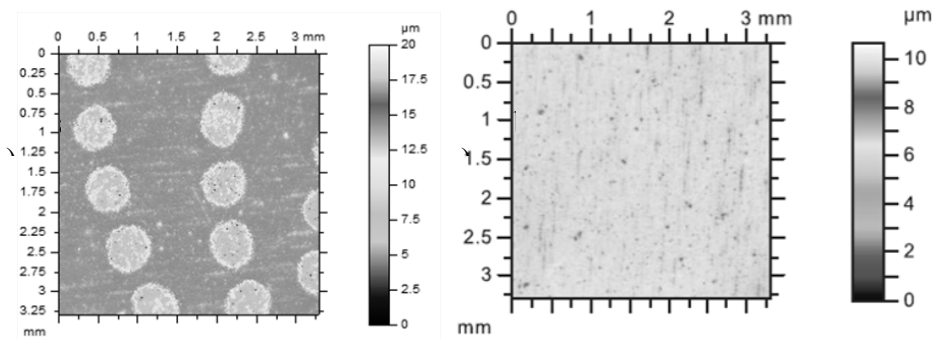
Część przeciwpróbek podlegała obróbce strumieniowo-ściernej w celu wykonania wgłębień na współpracujących powierzchniach w szyku kwadratowym o stopniu pokrycia 17%, średnica kieszeni smarowych wynosiła 500 μm , zaś głębokość 10 μm (**Rys. 4**).

METODYKA BADAŃ

Badania wykonano w dwóch wariantach. Pierwszy wariant obejmował badania przeprowadzone przy stałym obciążeniu wynoszącym 20 N, gdzie zmieniana była w kolejnych próbach jedynie prędkość ślizgania w zakresie od 0,4 m/s do 0,8 m/s, z krokiem 0,2 m/s. Drugi wariant badań przeprowadzono przy stałej prędkości ślizgania wynoszącej 0,4 m/s, zmieniano obciążenie normalne w zakresie od 20 N do 60 N z krokiem 20 N. Badania przeprowadzono przy stałym promieniu tarcia, który był mierzony pomiędzy osią tarczy a osią trzpienia przytrzymującego wahliwie przeciwpróbkę i wynosił 8 mm. Długość testu dla wszystkich przypadków wyrażona liczbą obrotów wykonanych przez tarczę wynosiła 5000. Na podstawie liczby obrotów i promienia tarcia wyznaczono całkowitą drogę ślizgania, która wynosiła 251,3 m. Badania przeprowadzono w warunkach niedoboru środka smarnego. W miejsce styku dostarczona została jedna kropla oleju L-AN-46 (0,08 ml).

Parametry oleju L-AN-46 były następujące:

- lepkość dynamiczna w 40°C: 46,0 mm^2/s ,
- lepkość dynamiczna w 100°C: 6,60 mm^2/s ,
- temperatura zapłonu > 170°C,
- gęstość w 15°C: 880 kg/m^3 .



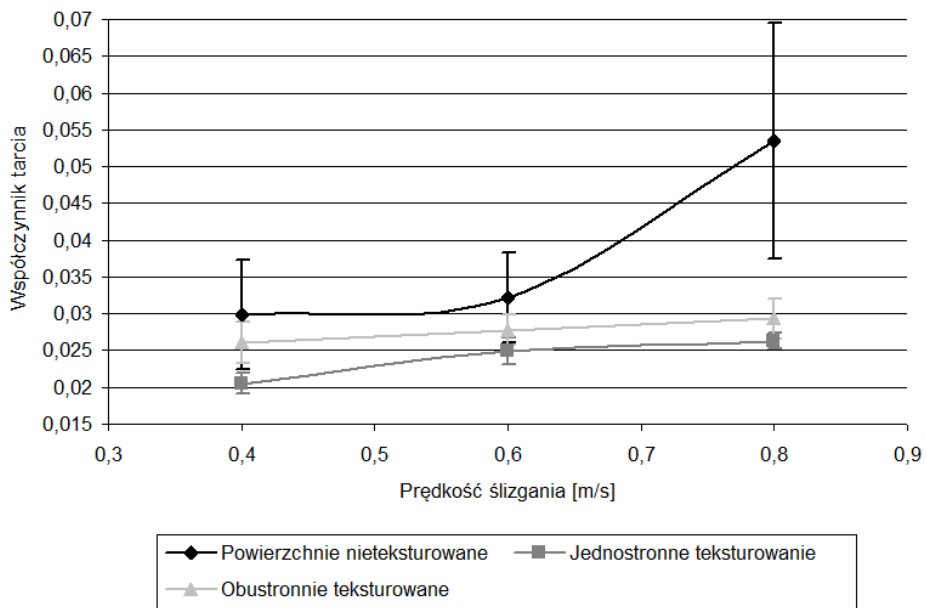
Rys. 5. Struktura geometryczna powierzchni przykładowej tarczy: a) z kieszeniami smarowymi w szyku spiralnym, b) tarczy nieteksturowanej

Fig. 5. Disc surface topography: a) with oil pockets in spiral array, b) untextured disc

Podczas trwania testu nie dostarczano dodatkowych ilości oleju. Badania rozpoczynano w temperaturze otoczenia ok. 22°C i nie stosowano układu stabilizacji temperatury. Każda próba powtórzona została 10 razy.

WYNIKI BADAŃ

Podczas badań obliczono współczynnik tarcia jako stosunek siły tarcia do obciążenia normalnego. Ze względu na specyfikę testera T-11 do obliczania średniego współczynnika tarcia nie brano pod uwagę początkowej fazy pracy węzła tarcioowego aż do momentu uzyskania 1000 obrotu. Na podstawie stabilnej fazy współpracy pomiędzy 1000 a 5000 obrotom próbki wyliczono wartości średnie współczynnika tarcia. Na **Rysunkach 6–7** przedstawiono uśrednione wartości oraz niepewności pomiaru wyrażone za pomocą odchyłeń standardowych obliczone na podstawie średniego współczynnika tarcia dla każdej próby.

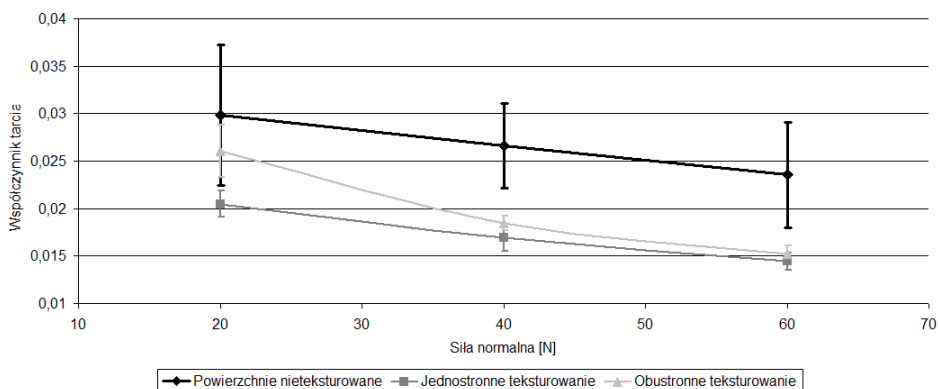


Rys. 6. Zależność współczynnika tarcia od prędkości ślizgania dla obciążenia 20 N

Fig. 6. The effect of sliding speed on the friction coefficient for normal load of 20 N

Analizując otrzymane wyniki przedstawione na **Rysunku 6**, można zauważyć, że bez względu na rodzaj skojarzenia przy zwiększaniu prędkości ślizgania wartość współczynnika tarcia rośnie. Największy przyrost można zaobserwować w przypadku skojarzenia nieteksturowanego, gdzie wraz ze wzrostem współczynnika tarcia rośnie odchylenie standardowe. Dla prędkości 0,4 m/s uzyskano zmniejszenie współczynnika tarcia o 30% dla powierzchni jedno-

stronnie teksturowanej w stosunku do tarczy nieteksturowanej. Natomiast zakres współczynnika tarcia dla obustronnego teksturowania pokrywa się z zakresem odchylenia standardowego dla próbki nieteksturowanej. Największe różnice zaobserwowano dla prędkości ślizgania 0,8 m/s, gdzie różnica pomiędzy próbkami jednostronnie teksturowanymi a nieteksturowanymi wynosiła 50%.



Rys. 7. Zależność współczynnika tarcia od obciążenia dla prędkości ślizgania 0,4 m/s
 Fig. 7. The effect of load on the friction coefficient for sliding speed of 0,4 m/s

Biorąc pod uwagę wyniki przedstawione na **Rysunku 7**, można zaobserwować, że najmniejsze współczynniki tarcia uzyskano dla obciążenia 60 N. Ponadto krzywe reprezentujące wartości średnie dla próbek jednostronnie teksturowanych i obustronnie teksturowanych mają wraz ze wzrostem obciążenia węzła ciernego tendencję zbieżną. Wzrost obciążenia wydaje się nie mieć wpływu na wartość, o jaką obniżony jest współczynnik tarcia przez teksturowanie jednostronne w porównaniu z brakiem tekstury (29%–33%).

WNIOSKI KOŃCOWE

1. Zastosowanie teksturowania zarówno jedno-, jak i obustronnego w znaczący sposób obniża wahania siły tarcia w porównaniu z powierzchniami nieteksturowanymi.
2. Dzięki wykorzystaniu teksturowania jednostronnego można uzyskać zmniejszenie siły tarcia zarówno w przypadku większych prędkości ślizgania (0,8 m/s), jak i przy zwiększonym obciążeniu do 60 N.
3. Zwiększanie obciążenia węzła ciernego powoduje, że uzyskano podobne wartości współczynnika tarcia dla jedno-, i obustronnego teksturowania.
4. Dla zastosowanego skojarzenia materiałowego właściwe będzie wykorzystywanie jednostronnego teksturowania, co ma uzasadnienie w przedstawionych badaniach, jak i jest celowe z ekonomicznego punktu widzenia.

LITERATURA

1. Graboń W., Pawlus P., Sęp J.: Tribological characteristics of one-process and two-process cylinder linear honed surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International* 2010; 43: 1882–92.
2. Campbell J.C.: Cylinder bore surface roughness in internal combustion engines: its appreciation and control. *Wear* 1972; 19: 163–8.
3. Etsion I.: State of the art in laser surface texturing. *ASME J Tribology* 2005;127(1); 248–253.
4. Gałda L., Koszela W., Pawlus P.: Surface geometry of slide bearings after percussive burnishing. *Tribology International* 2007; 40; 1516–1525.
5. Koszela W., Pawlus P., Gałda L.: The effect of oil pockets size and distribution on wear in lubricated sliding. *Wear* 2007; 263; 1585–1592.
6. Hashim N.L.S., Yahya A., Kadir M.R.A., Samion S., Mahmud N.: Manufacturing methods for machining micro pits of hip implant for metal-on-metal lubrication. *International Conference on Biomedical Engineering, ICoBE 2012*; 55–59.
7. Wos S., Koszela W., Pawlus P.: Tribological behaviours of textured surfaces under conformal and non-conformal starved lubricated contact conditions. *Proc. MechE Part J: J Engineering Tribology* 2015; 229(4); 398–409.
8. Wos S., Koszela W., Pawlus P.: Wpływ obustronnego teksturowania powierzchni trących w szykach regularnych i nieregularnym na wartość siły tarcia. *TRIBOLOGIA Teoria i praktyka* 2014; 5; 169–176.
9. Wos S., Koszela W., Pawlus P.: Determination of oil demand for textured surfaces under conformal contact conditions. *Tribology International* 2015; <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.05.016>.

Summary

To obtain the effect of texturing both sides of sliding surfaces, investigations were made to determine the impact of basic parameters like sliding speed and normal force on friction force. During the investigation, samples of steel 42CrMo4 were used. The research was carried out for untextured and textured surfaces (one-sided and both-sided).