

Lidia GAŁDA*, **Jarosław SĘP***, **Leszek TOMCZEWSKI***

WPLYW GEOMETRII MIKROWGŁĘBIŃ W POWIERZCHNI NA WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE ELEMENTÓW ŚLIZGOWYCH

**THE EFFECT OF PIT GEOMETRY IN THE SURFACE
ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SLIDING
ELEMENTS**

Słowa kluczowe:

topografia powierzchni, nagniatanie, słabo zasilane smarowanie

Key words:

surface topography, burnishing, starved lubrication

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych węzłów ślizgowych w skojarzeniu materiałowym stal–stal. Badania realizowano z wykorzystaniem testera T-11 ze zmodyfikowanym węzłem ślizgowym typu kulka–tarcza w styku rozłożonym. Tarcza została poddana obróbce nagniataniem w celu ukształtowania w niej wgłębień. W pracy porównano wartości współczynnika tarcia

* Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, Polska, e-mail: lgktmiop@prz.edu.pl.

w odniesieniu do współpracujących ślizgowo elementów z wgłębieniami o zróżnicowanej geometrii oraz bez wgłębień. Wykazano, że obecność oraz geometria wgłębień w powierzchni w sposób istotny wpływa na charakterystyki tribologiczne pracy badanych węzłów ślizgowych.

WPROWADZENIE

Tarcie i zużycie tribologiczne zależą przede wszystkim od stanu warstw wierzchnich obszarów styku trących się elementów maszyn [L. 1]. Wśród wielu technologii kształtujących stan powierzchni oraz stan warstw podpowierzchniowych elementów trących w ostatnich latach coraz większym zainteresowaniem cieszą się techniki teksturowania powierzchni [L. 2, 3]. Struktura geometryczna powierzchni wpływa w sposób znaczący na charakterystyki tribologiczne elementów ślizgowych. Rysy po honowaniu na powierzchni wewnętrznej cylindrów wpływają na zmniejszenie zużycia [L. 4]. Specjalnie ukształtowane rowki na czopie o określonej geometrii i orientacji w stosunku do kierunku ruchu umożliwiają zwiększenie nośności łożysk [L. 5]. Obecność sferycznych wgłębień na powierzchni czopa powoduje zmniejszenie zużycia ściernego zarówno czopa, jak i panwi współpracujących ślizgowo w warunkach zwiększonego zapylenia [L. 6]. Wgłębienia sferyczne na powierzchni ślizgowej brązowych panwi w stopniu pokrycia około 25% pozwalają na zmniejszenie zużycia o prawie 30% [L. 7], natomiast wprowadzenie zanieczyszczeń do substancji smarującej powoduje większe zużycie powierzchni z wgłębieniami w porównaniu z powierzchniami gładkimi [L. 8]. W pracy [L. 9] wykazano, że odpowiedni kształt i stopień pokrycia powierzchni wgłębieniami równy około 10% prowadzi do zmniejszenia współczynnika tarcia i zużycia węzłów ślizgowych w skojarzeniu stal–żeliwo sferoidalne. Odpowiedni kształt wgłębień w płaszczyźnie ruchu względnego może spowodować powstawanie hydrodynamicznej siły wyporu skierowanej prostopadle do powierzchni, przeciwnie do obciążenia zewnętrznego [L. 10]. Możliwa jest wtedy współpraca w warunkach tarcia mieszanego lub nawet płynnego. Jednocześnie jednak w przypadku smarowania hydrodynamicznego nie zaleca się stosować wgłębień w powierzchni ślizgowej, szczególnie głębokich, ponieważ mogą wpływać na przerwanie ciągłości filmu olejowego, pogarszając warunki smarowania. W pracy [L. 11] wykazano, że wgłębienia w powierzchni pogarszają odporność na zatarcie przy wyższych prędkościach poślizgu.

Pomimo stosowania różnorodnych układów smarowania doprowadzających odpowiednią ilość substancji smarującej do węzłów ciernych, w warunkach eksploatacyjnych węzły ślizgowe pracują również przy słabo zasilanym smarowaniu. Dzieje się tak w przypadku uruchamiania i zatrzymywania maszyn i urządzeń. Ciecz smarująca nie rozdziela powierzchni trących i część obciążenia przenoszona jest przez mikroobszary styku powierzchni współpracujących

[L. 12]. W takiej sytuacji mikrowgłębienia w powierzchni poprawiają warunki smarowania poprzez trwałe zwiększenie pojemności olejowej [L. 13].

Wgłębienia kształtowane w powierzchniach ślizgowych charakteryzują się dużym zakresem wymiarów głębokości i długości, a także zróżnicowanym stopniem pokrycia powierzchni. Głębokość wgłębień najczęściej waha się od 1 do 100 μm , długość mieści się w zakresie kilkadziesiąt do 1000 μm , iloraz głębokości do długości jest między 0,01 a 0,3, natomiast stopień pokrycia powierzchni wynosi od kilku do powyżej 50%. Wpływ cech geometrycznych wgłębień na właściwości użytkowe zależy od warunków pracy wężła i występujących obciążeń.

Celem badań była ocena możliwości poprawy pracy węzłów ślizgowych przy słabo zasilanym smarowaniu poprzez ukształtowanie określonej mikrogeometrii powierzchni.

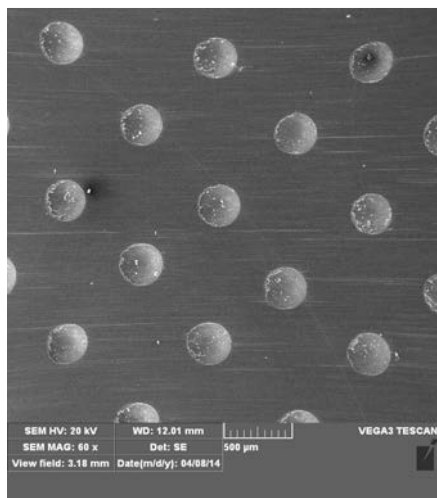
METODYKA BADAŃ

Badania tribologiczne zrealizowano z wykorzystaniem testera T-11 ze zmodyfikowanym węzłem typu kulka-tarcza. Styk rozłożony otrzymano poprzez zeszlifowanie części kulki do uzyskania nominalnej powierzchni przylegania próbki i przeciwpróbki około 12 mm². Próby wykonywano przy naciskach powierzchniowych p równych 0,8 MPa i 3,2 MPa. Prędkość ślizgową V zmieniano w zakresie od 0,02 do 0,2 m/s co 0,02 m/s. Jako ciecz smarującą zastosowano olej maszynowy L-AN 46. Jedną kroplę oleju umieszczano na powierzchni próbki, następnie rozprowadzono olej elastycznym zbierakiem, tak aby zapełnić wgłębienia i nie pozostawić w nadmiarze na powierzchni nośnej. Parametrem mierzonym była siła tarcia występująca między współpracującymi ślizgowo elementami przy zróżnicowanych prędkości ślizgowej i naciskach powierzchniowych w odniesieniu do poszczególnych wariantów powierzchni. W celu określenia rozrzutu wyników próby powtarzano trzykrotnie. Pomiar współczynnika tarcia realizowany był w jednym biegu dla całego zakresu prędkości. Przed badaniem właściwym powierzchnie poddane zostały docieraniu. Do pomiaru oporów ruchu zastosowano czujnik tensometryczny siły o zakresie 50 N i klasie dokładności 0,1.

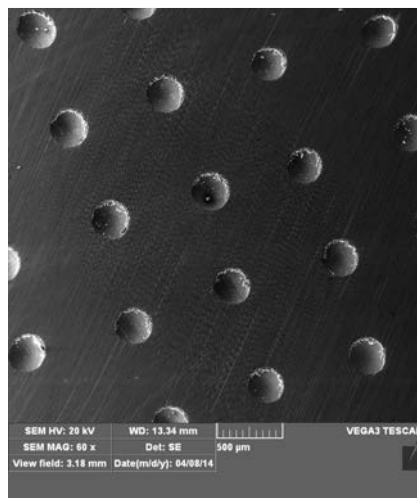
PRZYGOTOWANIE POWIERZCHNI

Próbki stanowiły tarcze o średnicy 25,4 mm. W celu ukształtowania określonej topografii powierzchni próbki ze stali 42CrMo4 o twardości 30HRC poddano obróbce nagniataniem udarowym. Ustalono jednakowe rozmieszczenie wgłębień w miejscach przecięcia się siatki linii równoległych i do nich prostopadłych, zakładając stałą odległość między wgłębieniami równą 0,8 mm. Proces nagniatania zrealizowano za pomocą głowicy udarowej ze stożkową końcówką

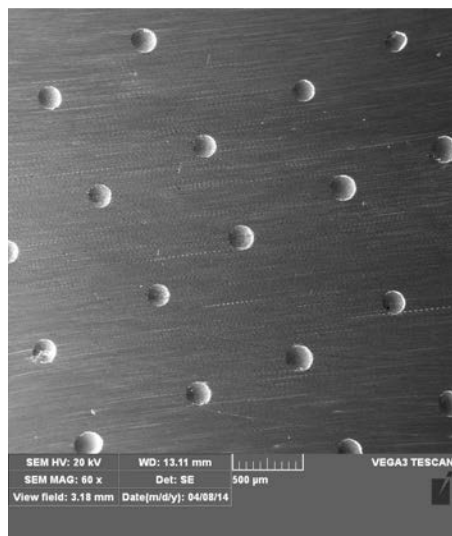
roboczą z zakończeniem kulistym o promieniu $R = 0,125$ mm. Po nagniataniu próbki poddano szlifowaniu w celu usunięcia wypływek materiału wokół wgłębień. Na **Rys. 1** przedstawiono zdjęcia powierzchni po obróbce nagniataniem i szlifowaniem.



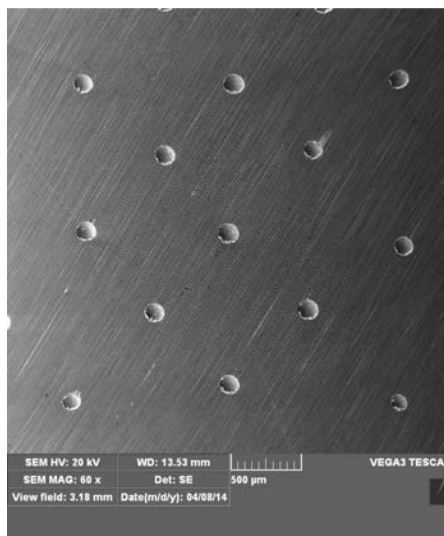
$Sp = 12\%$



$Sp = 9\%$



$Sp = 3\%$



$Sp = 2\%$

Rys. 1. Zdjęcia powierzchni z wgłębieniami po nagniataniu o zróżnicowanych wymiarach
Fig. 1. The pictures of the surfaces with depressions after burnishing with differential dimensions

W wyniku realizowanej obróbki otrzymano powierzchnie o określonym stopniu pokrycia wgłębieniami i wgłębienia w zdeterminowanym układzie i geometrii. W **Tabeli 1** zamieszczono wybrane wielkości geometryczne charakteryzujące otrzymane powierzchnie.

Tabela 1. Średnie wartości wybranych wielkości geometrycznych wgłębień w analizowanych powierzchniach

Table 1. The average values of selected geometrical parameters of depressions in analyzed surfaces

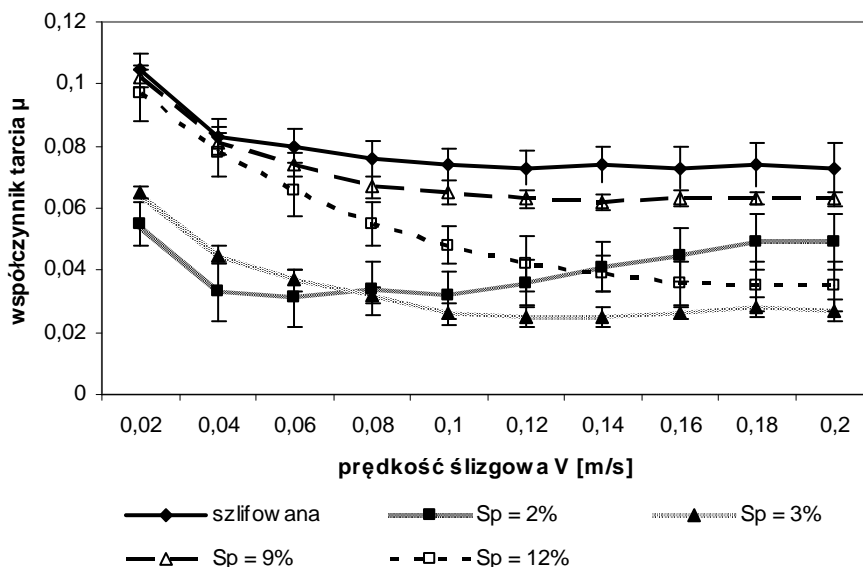
Lp.	Głębokość h [μm]	Średnica d [μm]	h/d	Stopień pokrycia Sp [%]	Pojemność olejowa wgłębienia v _i [μm ³]
1	60	300	0,19	12	1 574 000
2	47	260	0,18	9	926 000
3	17	160	0,11	3	130 000
4	11	120	0,09	2	50 000

Przeciwpróbki stanowiły kulki ze stali łożyskowej 100Cr6 o twardości około 62 HRC. W celu uzyskania styku rozłożonego część kulki szlifowano do uzyskania założonej powierzchni przylegania około 12 mm². Chropowatość powierzchni próbek Ra wynosiła średnio 0,2 μm, natomiast przeciwpróbek poniżej 0,1 μm. Badania realizowano w temperaturze około 21°C.

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na **Rys. 2** i **4** przedstawiono wykresy zmian wartości współczynnika tarcia μ w zależności od prędkości poślizgu V przy różnych obciążeniach p węzła ślizgowego i zróżnicowanej topografii powierzchni. Przy niewielkim obciążeniu p równym 0,8 MPa w całym badanym zakresie zmienności prędkości ślizgowej V wartości współczynnika tarcia węzłów tribologicznych z wgłębieniami po nagniataniu były mniejsze w porównaniu z tymi po szlifowaniu (**Rys. 2**). W zależności od warunków pracy węzłów ciernych oraz geometrii wgłębień zmniejszenie wartości współczynnika tarcia wynosiło od 3 do 63%.

Analizując zależności przedstawione na **Rys. 2**, zaobserwowano nieznaczne, około 3–8% zmniejszenie wartości współczynnika tarcia przy wyższym stopniu pokrycia wgłębieniami przy minimalnej prędkości poślizgu $V = 0,02$ m/s. Przy mniejszym stopniu pokrycia wgłębieniami $Sp = 2\%$ i $Sp = 3\%$ właściwości tribologiczne węzłów ślizgowych w warunkach skąpego smarowania poprawiają się znacząco, natomiast przy $Sp = 9\%$ i $Sp = 12\%$ współczynnik tarcia mieścił się w granicy błędu statystycznego wartości współczynnika tarcia powierzchni szlifowanej. Przy wyższych prędkościach poślizgu wartości współczynnika tarcia powierzchni teksturowanych również były niższe



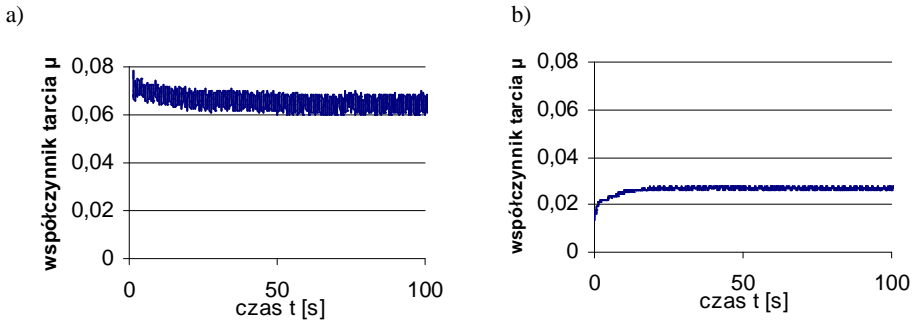
Rys. 2. Wykres zmian współczynnika tarcia μ w zależności od prędkości poślizgu V przy założonym obciążeniu próbki $p = 0,8$ MPa

Fig. 2. The graph of the friction coefficient μ in dependence of the sliding speed V at the assumed load of $p = 0,8$ MPa

w porównaniu z powierzchniami bez wgłębień po nagniataniu. Zmniejszenie wartości współczynnika tarcia w porównaniu z węzłami z powierzchnią po szlifowaniu wynosiło 14–63% przy $V = 0,2$ m/s, a maksymalna 63% redukcja wystąpiła przy stopniu pokrycia $Sp = 3\%$. Węzeł ślizgowy z powierzchnią o stopniu pokrycia wgłębieniami $Sp = 2\%$ oraz stosunkiem wymiarów geometrycznych wgłębień h/d równym 0,09 począwszy od prędkości tarcia 0,1 m/s charakteryzował się systematycznym zwiększaniem współczynnika tarcia do wartości 0,05 przy $V = 0,2$ m/s. Natomiast podobny węzeł, w którym Sp wynosił 3%, wyróżniał się współczynnikiem tarcia 0,027 przy maksymalnej badanej prędkości poślizgu 0,2 m/s. Przy relatywnie podobnych wartościach wielkości geometrycznych wgłębień w tych dwóch wariantach zasadniczo różniły się one pojemnością olejową. Pojemność olejowa wgłębień przy $Sp = 3\%$ była prawie 3-krotnie większa w porównaniu z pojemnością wgłębień przy $Sp = 2\%$.

Przeprowadzono dodatkowe badania dla wybranych wariantów powierzchni, tj. po szlifowaniu i ze stopniem pokrycia wgłębieniami równym 3%. Testy zrealizowano przy stałym obciążeniu $p = 0,8$ MPa oraz stałej prędkości tarcia $V = 0,2$ m/s. Na Rys. 3 przedstawiono wykresy wartości współczynnika tarcia w czasie $t = 100$ s. Wartości współczynników tarcia w odniesieniu do wybranych wariantów po określonym czasie ustalają się na poziomie 0,065 (Rys. 3a) i 0,027 (Rys. 3b). Otrzymano podobne wartości współczynników tarcia jak podczas prób przy wzrastającej prędkości poślizgu. W przypadku

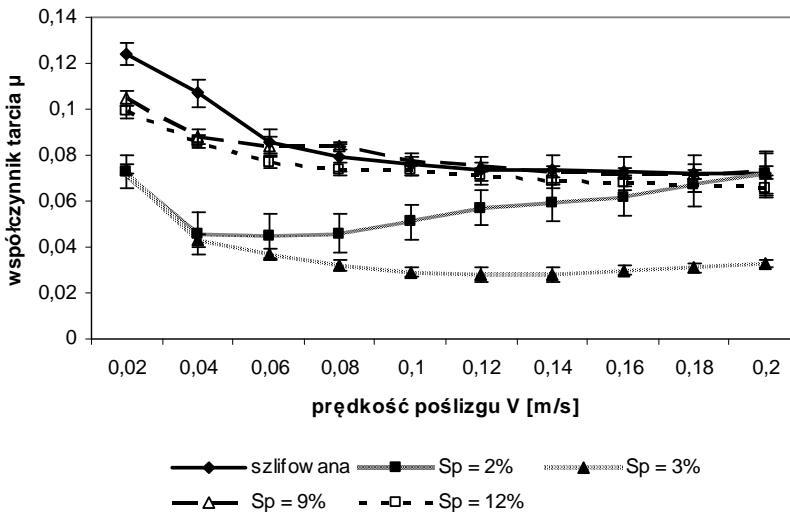
węzłów, gdzie występowały wgłębienia w powierzchni tarcia początkowo współczynnik tarcia μ przyjmował niskie wartości, poniżej 0,02, po kilkunastu sekundach osiągał ustabilizowaną wartość.



Rys. 3. Przebieg wartości współczynnika tarcia μ przy obciążeniu $p = 0,8$ MPa i prędkości poślizgu $V = 0,2$ m/s w węzłach tarcia, których powierzchnie są po szlifowaniu (a) oraz powierzchnia tarczy zawiera wgłębienia w wariancie $Sp = 3\%$ (b)

Fig. 3. The course of the friction coefficient value μ at the load $p = 0.8$ MPa and the sliding speed $V = 0.2$ m/s in the friction pairs whose surfaces are after grinding (a) and the disc surface contains the depressions in the variant $Sp = 3\%$ (b)

Na **Rys. 4** przedstawiono zależność współczynnika tarcia od prędkości poślizgu przy maksymalnych badanych naciskach $p = 3,2$ MPa.

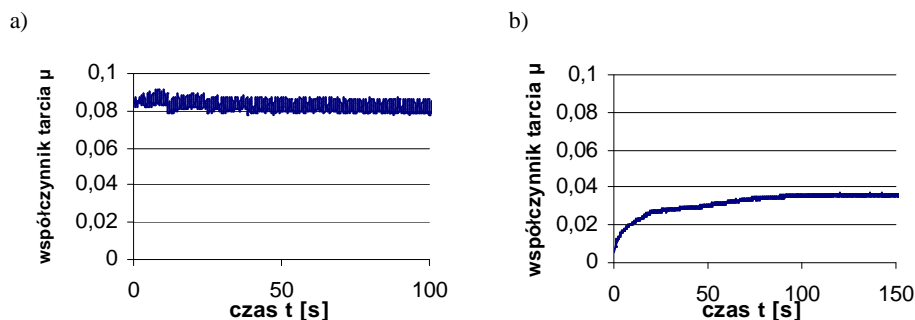


Rys. 4. Wykres zmian współczynnika tarcia μ w zależności od prędkości poślizgu V przy założonym obciążeniu próbki $p = 3,2$ MPa

Fig. 4. The graph of the friction coefficient μ in dependence of the sliding speed V at the assumed load of $p = 3.2$ MPa

Podczas tarcia przy minimalnej prędkości $V = 0,02$ m/s otrzymano mniejsze wartości współczynnika tarcia węzłów z powierzchnią teksturowaną w porównaniu z węzłami bez wgłębień w powierzchni. Najlepszy rezultat w postaci ponad 40% zmniejszenia wartości μ uzyskano przy $Sp = 2\%$, jednak wraz ze wzrostem prędkości od 0,04 m/s wartość współczynnika tarcia monotonicznie wzrastała do około 0,07. Przy prędkości poślizgu $V = 0,2$ m/s wartości współczynnika tarcia powierzchni szlifowanych i powierzchni z wgłębieniami były podobne, poza jednym wyjątkiem przy stopniu pokrycia powierzchni wgłębieniami $Sp = 3\%$.

Podobnie jak wcześniej, również przy $p = 3,2$ MPa przeprowadzono dodatkowe próby. Przy stałej prędkości $V = 0,2$ m/s zbadano węzły ślizgowe, których powierzchnie były szlifowane oraz z wgłębieniami przy $Sp = 3\%$. Na **Rys. 5** przedstawiono przebieg zmian wartości współczynnika tarcia. W odniesieniu do powierzchni szlifowanej wartość μ wynosiła około 0,08 (**Rys. 5a**), natomiast w przypadku powierzchni z wgłębieniami początkowo występował niski współczynnik tarcia około 0,01, ale po kilkudziesięciu sekundach (około 80) wartość stabilizuje się na poziomie 0,035.



Rys. 5. Przebieg wartości współczynnika tarcia μ przy obciążeniu $p = 3,2$ MPa i prędkości poślizgu $V = 0,2$ m/s w węzłach tarcia, których powierzchnie są po szlifowaniu (a) oraz powierzchnia tarczy zawiera wgłębienia w wariancie $Sp = 3\%$ (b)

Fig. 5. The course of the friction coefficient value μ at the load $p = 3.2$ MPa and the sliding speed $V = 0.2$ m/s in the friction pairs whose surfaces are after grinding (a) and the disc surface contains the depressions in the variant $Sp = 3\%$ (b)

W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano stopniowy, powolny wzrost współczynnika tarcia w początkowej fazie próby tarcia przy stałej prędkości poślizgu 0,2 m/s w odniesieniu do węzłów z wgłębieniami (**Rys. 3b** i **5b**). Substancja smarująca zgromadzona we wgłębieniach w momencie zbliżenia współpracujących powierzchni pod działaniem obciążenia została ścisnana i mogła brać udział w przenoszeniu obciążenia.

Z przeprowadzonych badań wynika, iż istnieje taka geometria wgłębień w powierzchni ślizgowej, która wpływa w sposób istotny na zmniejszenie war-

tości współczynnika tarcia przy małych prędkościach poślizgu od 0,02 do 0,2 m/s i obciążeniach w zakresie 0,8–3,2 MPa w warunkach skąpego smarowania. W przypadku powierzchni elementów współpracujących ślizgowo szczególnego znaczenia nabierają nierówności w postaci wgłębień w powierzchni, w których może gromadzić się substancja smarująca, rozdzielająca elementy wężła ciernego. Przy odpowiednio dobranych wymiarach oraz częstotliwości występowania wgłębień w powierzchni istnieje możliwość poprawy właściwości tribologicznych węzłów ślizgowych nawet przy słabym smarowaniu. Najlepsze rezultaty w prowadzonych badaniach i przyjętych warunkach pracy wężła ślizgowego uzyskano przy małym stopniu pokrycia powierzchni wgłębieniami $Sp = 3\%$, $h/d = 0,11$ oraz pojemności olejowej pojedynczego wgłębienia $130000 \mu\text{m}^3$.

PODSUMOWANIE

Struktura geometryczna powierzchni powinna zostać zaprojektowana adekwatnie do warunków pracy konkretnego wężła ciernego. W zależności od wytycznych konstrukcyjnych można następnie opracować technologię kształtowania wgłębień w sposób zdeterminowany, wykorzystując, tak jak w tym przypadku, technologię nagniatania lub inne techniki, jak chociażby laserowe.

W wyniku prowadzonych badań wykazano, że przy obciążeniach równych 0,8 MPa i prędkościach poślizgu w zakresie 0,02–0,2 m/s wgłębienia w powierzchni ślizgowej poprawiają charakterystyki tribologiczne przy skąym smarowaniu. Przy niewielkim stopniu pokrycia powierzchni wgłębieniami równym około 3% i ilorazie h/d wgłębień bliskim 0,1 współczynnik tarcia był mniejszy o ponad 60% w porównaniu z μ powierzchni szlifowanych.

Przy większych naciskach wynoszących około 3,2 MPa obecność wgłębień w powierzchni w większości badanych przypadków nie wywiera tak korzystnego wpływu w postaci zmniejszenia współczynnika tarcia. Jeden z badanych wariantów ($Sp = 3\%$, $h/d = 0,11$ oraz pojemności olejowej $v_i = 130000 \mu\text{m}^3$) charakteryzował się niższym o od 40% do ponad 50% współczynnikiem tarcia w porównaniu z węzłem ślizgowym z powierzchniami szlifowanymi.

Reasumując, obecność wgłębień o określonej geometrii i ustalonym stopniu pokrycia powierzchni wpływa na poprawę pracy węzłów ślizgowych w warunkach skąpego smarowania przy małych prędkościach poślizgu. Poprzez gromadzenie we wgłębieniach substancji smarującej, która w pewnych warunkach może brać udział w przenoszeniu obciążenia, zmniejszamy mikroobszary styku powierzchni współpracujących w węzłach ślizgowych.

LITERATURA

1. Hebda M.: Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Warszawa – Radom 2007.
2. Antoszewski B, Radek N.: Tribologiczne i technologiczne aspekty teksturowania par ślizgowych o powierzchniach płaskich. *Tribologia* 2/2008 (218), s. 25–33.
3. Etsion I.: State of the art in laser surface texturing, *ASME Journal of Tribology* 127, 2005, s. 248–253.
4. Pawlus P.: Effects of honed cylinder surface topography on the wear of piston-piston ring-cylinder assemblies under artificially increased dustiness conditions, *Tribology International* 26/1, 1993, 49–55.
5. Sęp J.: Właściwości filmu olejowego w poprzecznych łożyskach ślizgowych z nietypową geometrią czopa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
6. Sęp J., Pawlus P., Gałda L.: The effect of helical groove geometry on journal abrasive wear. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 13, 2013, s. 150–157.
7. Koszela W.: Nagniatanie impulsowe powierzchni walcowych pracujących w warunkach tarcia. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2003.
8. Koszela W., Dzierwa A., Gałda L., Pawlus P.: Experimental investigation of oil pockets on abrasive wear resistance. *Tribology International* 46, 2012, s. 145–153.
9. Gałda L., Dzierwa A., Pawlus P., Reizer R.: Improvement of tribological properties of co-acting elements by oil pockets creation on sliding surfaces. *Meccanica* 46, 2011, s. 523–534.
10. Stępień P.: Analiza hydrodynamicznego wyporu mikroklinów smarnych na powierzchni o regularnej makrogeometrii, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* nr 36, *Mechanika* z. 15, 1987, s. 231–236.
11. Gałda L., Dzierwa A., Sęp J., Pawlus P.: The effect of oil pockets shape and distribution on seizure resistance in lubricated sliding. *Tribology Letters* 37, 2010, s. 301–311.
12. Szczerek M., Wiśniewski M.: *Tribologia i tribotechnika*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
13. Legutko S., Nosal S.: *Kształtowanie technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej części maszyn*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych Polska Akademia Nauk, Poznań 2004.

Summary

The results of investigations of sliding pairs in material matching (e.g. steel-steel) are presented in the article. The examinations were realized with the utilization of a T-11 tester with the modified sliding pair of the type ball-disc in uniform contact. To facilitate pit formations, the disc surface was subjected to burnishing. The friction coefficient values were compared in reference to co-operating elements with pits of differential geometry and without depressions. It was demonstrated that presence and the geometry of depressions in the surface influenced the tribological characteristics of the operating sliding assemblies.