

Lidia GAŁDA, Andrzej DZIERWA
Katedra Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji
Politechnika Rzeszowska

WPLYW MIKROSTEREOMETRII POWIERZCHNI ŁOŻYSK ŚLIZGOWYCH NA ODPORNOŚĆ NA ZACIERANIE

Streszczenie: W artykule opisano badania wpływu powierzchni z wgłębieniami na odporność na zacieranie pary: stal - żeliwo pracującej w warunkach tarcia ślizgowego. Przedstawiono sposób obliczania stopnia pokrycia powierzchni z regularnie rozmieszczonymi wgłębieniami o różnym kształcie wykonywanymi metodą nagniatania udarowego. Zaprezentowano wyniki badań odporności na zatarcie pary: stal 40HM i żeliwo EN-GJS-400-15.

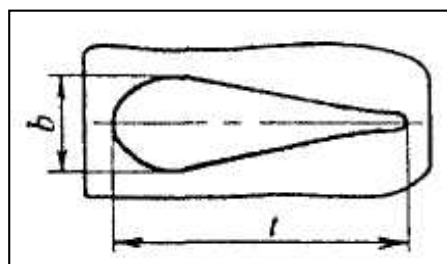
WPROWADZENIE

Zacieranie stanowi duże zagrożenie dla węzłów z materiałów jednoimiennych takich jak stal lub żeliwo, pracujących w warunkach tarcia ślizgowego a faktem bezspornym jest to, że istotny wpływ na zacieranie współpracujących powierzchni wywiera ich stereometria w skali mikro. Na podstawie analizy krytycznego modelu zacierania adhezyjnego [1] zaproponowany został jakościowy model warstwy wierzchniej zapewniający zwiększoną odporność na zacieranie elementów jednoimiennych. Postulowana warstwa wierzchnia powinna mieć m.in. powierzchnię o mikrosterieometrii ukształtowanej tak, aby uzyskać odpowiednią pojemność olejową oraz zapewnić przerywanie styku tarciovego.

Warstwę wierzchnią o takich właściwościach stosunkowo łatwo można uzyskać metodą nagniatania udarowego. Po takiej obróbce na powierzchni elementu nagniatanego ukształtowane zostaną wgłębienia, które mogą przejmować zadania kieszeni smarnych, utrzymując smar i gromadząc produkty zużycia ściernego.

Jeśli chodzi o kształt wgłębień na powierzchni łożyska to najczęściej spotykane i badane są odciski sferyczne-różnej wielkości i w różnej konfiguracji, zastosowane zresztą na skalę przemysłową w łożyskach ślizgowych firmy Glacier. Bardziej interesujący jednak wydaje się kształt odcisku w formie kropli (rys. 1).

Takie wgłębienia nanoszone na czop wału szerszą częścią zwrócone w kierunku obrotu wału, nabierają olej, który wciskany jest w szczelinę (luz), gdzie powstaje ciśnienia hydrodynamiczne, mogące zrównoważyć obciążenie zewnętrzne [2].



Rys. 1. Odcisk w formie kropli [2]

METODYKA BADAŃ

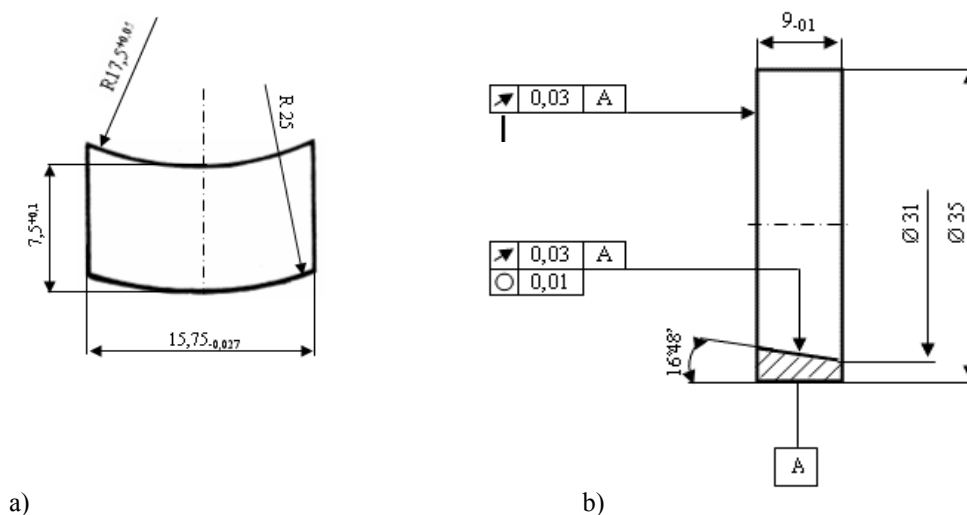
Celem badań było określenie możliwości poprawy odporności na zacieranie skojarzeń jednoimiennych typu stal-żeliwo poprzez zastosowanie nagniatania udarowego jako obróbki kształtującej warstwę wierzchnią.

Nagniatanie udarowe jest tanią, efektywną i prostą metodą obróbki, której kinematyka stwarza możliwość optymalizacji kształtu i układu wgłębień w powierzchni elementu ciernych. Kształt i wymiary wgłębień można regulować poprzez dobór odpowiedniej końcówki udarowej oraz parametrów nagniatania; częstości uderzeń, obrotów i posuwu. Obróbka wymaga specjalnego stanowiska. Na takim, wykonanym w Politechnice Rzeszowskiej stanowisku [6] wykonano obróbkę próbek do badań dobierając parametry obróbki (kształt końcówki roboczej bijaka, posuw, siłę sprężyny, częstość uderzeń) tak aby uzyskać żądany kształt i rozmieszczenie śladów poobróbkowych.

Próby odporności na zacieranie przeprowadzono na testerze do badań tribologicznych T-05. Badano pary:

- próbka o twardości 32HRC ze stali 40HM w trzech wariantach:
 - I - szlifowana,
 - II - szlifowana i nagniatana udarowo z odciskami sferycznymi,
 - III - szlifowana i nagniatana udarowo z odciskami w kształcie kropli;
- przeciwpróbka - wycinek panewki o powierzchni roboczej szlifowanej i stępionych ostrych krawędziach.

Przeciwpróbka wykonana była z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15 i ulepszona do twardości 50 HRC. Kształt i wymiary próbki i przeciwpróbki zostały podane na rys. 2.



Rys. 2. Przeciwpróbka (a) i próbka (b) do badań tribologicznych

W próbkach w II i III wariantcie wypływki po nagniataniu zostały usunięte równomiernie na całym obwodzie poprzez ponowne szlifowanie. Przy zastosowanych parametrach otrzymano wgłębienia posiadające kilkadziesiąt mikrometrów głębokość i długości osi elipsy około 900 mikrometrów (średnia długość z obu osi elipsy) w przypadku odcisków sferycznych oraz długość około 800 mikrometrów w przypadku odcisku w kształcie kropli.


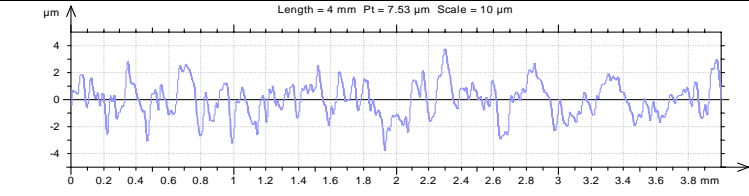

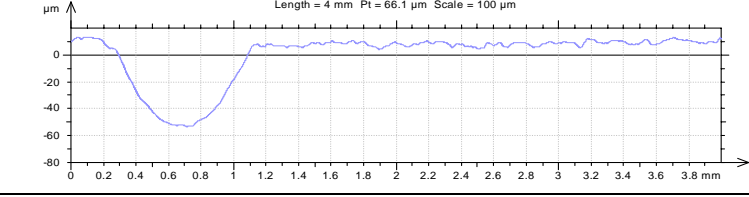

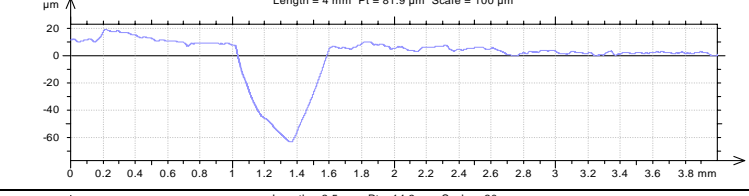

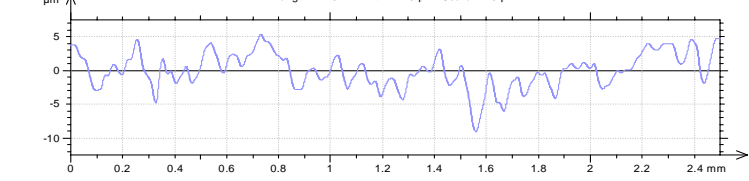
Tak przygotowane próbki poddano docieraniu na testerze T-05. Badanie odporności na zacieranie przeprowadzono po kilkunastominutowym docieraniu próbek i przeciwpróbek, po którym uzyskano ponad 70% powierzchni przylegania. Warunki tarcia dobrano doświadczalnie tak, aby uzyskać w miarę szybkie zatarcie próbek szlifowanych, stanowiących poziom odniesienia. Eksperyment prowadzono przy prędkości ślizgania 0,27 m/s, wzrastającym nacisku jednostkowym, przy smarowaniu zanurzeniowym w oleju maszynowym L-AN 46, który podgrzano wstępnie do temperatury $T_0 = 30^{\circ}\text{C}$. W badaniach zastosowano przebieg obciążania

charakteryzujący się stałymi przyrostami obciążenia $\Delta Q = 300 \text{ N}$, zaczynając od $Q = 900 \text{ N}$ i stałymi przedziałami czasu $\Delta t = 5 \text{ min}$. W trakcie badań prowadzono ciągłą rejestrację siły tarcia oraz temperatury strefy tarcia. Za objaw zatarcia uważano skokowy wzrost rejestrowanej siły tarcia.

Jako parametr służący do porównania odporności na zatarcie badanych próbek przyjęto siłę tarcia w momencie zatarcia a dokładniej – jej wartość zarejestrowaną przed skokowym wzrostem.

Fotografie oraz profilogramy powierzchni próbek i przeciwpróbki zestawiono w tab. 1.

Tab. 1. Fotografie oraz profilogramy powierzchni przed zatarciem

Wariant obróbki	Fotografia	Profilogram
Próbka szlifowana-wariant I		
Próbka z odciskami sferycznymi-wariant II		
Próbka z odciskami w kształcie kropli-wariant III		
Przeciw-próbka		

OBLICZENIA UDZIAŁU PROCENTOWEGO POWIERZCHNI ZAJĘTEJ PRZEZ ŚLADY OBRÓBKJI

Z praktycznych względów, tj. do obliczania i konstruowania łożysk ślizgowych, konieczna jest znajomość tzw. powierzchni nośnej lub powierzchni zajmowanej przez wgłębienia (stopień pokrycia śladami obróbkowymi). Stopień pokrycia śladami obróbkowymi jest określany jako stosunek powierzchni wgłębień A_r , do powierzchni całkowitej i wyrażany w procentach [3]. Zdeterminowany charakter zależności między technologicznymi parametrami obróbki i konstrukcyjnymi urządzenia do nagniatania udarowego, a mikrosterometrią powierzchni pozwala uzyskać odpowiednią powierzchnię nośną, ilość, rozmiar, kształt i układ wgłębień, pełniących rolę kieszeni smarnych. Dla obliczenia stopnia pokrycia wystarczy zatem obliczyć powierzchnię pojedynczego odcisku, pomnożyć przez ilość odcisków w pewnym wyznaczonym obszarze i następnie podzielić przez pole tego obszaru.

Dla wariantu II - z odciskami sferycznymi zmierzono na mikroskopie warsztatowym półosie (a, b) elipsy, podstawiono do wzoru na pole elipsy i uzyskano wynik:

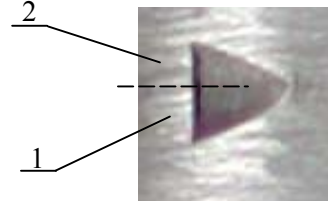
$$P_e = \pi * a * b = 3.14 * 0.46 * 0.45 = 0.64998 \text{ [mm}^2\text{]}$$

P_e pomnożono przez ilość odcisków $i = 13$ w wyznaczonym obszarze $9 \times 10 \text{ [mm}^2\text{]}$ otrzymano wynik $P_E = 8.4497 \text{ [mm}^2\text{]}$. Stopień pokrycia odciskami sferycznymi wyniósł zatem:

$$A_{rs} = \frac{P_E}{90} * 100 \% = 9.388 \%$$

Dla wariantu III obliczenie pola powierzchni odcisku (w kształcie kropli) okazało się trudniejsze. Dodatkowo podczas obserwacji pod mikroskopem okazało się, że odcisk nie jest symetryczny. W celu jak najdokładniejszych obliczeń podzielono obszar odcisku na dwa podobszary 1 i 2 (rys. 3).

Na mikroskopie warsztatowym zebrano punkty opisujące oba podobszary i posługując się programem Grapher 3 dla każdego z nich utworzono wykresy obrazujące kształt odcisku. Wykresy te następnie aproksymowano wielomianem 7-go stopnia, jako najbardziej odzwierciedlającym kształt krawędzi:



Rys. 3. Widok odcisku w kształcie kropli

$$Y_1 = 4,30458 * 10^{-5} + 1,69211 * x - 12,94016 * x^2 + 99,45043 * x^3 - 383,94587 * x^4 + 741,88889 * x^5 - 696,85185 * x^6 + 253,96825 * x^7$$

$$Y_2 = 0,28604 - 0,74256 * x + 9,91929 * x^2 - 76,37639 * x^3 + 262,80092 * x^4 - 456,30556 * x^5 + 390,64815 * x^6 - 130,95238 * x^7$$

Następnie wprowadzono otrzymane funkcje do programu Mathematica 5.0 i po scałkowaniu uzyskano pola poszczególnych podobszarów:

$$\text{Pole podobszaru 1} = \int_0^{0,8} Y_1 * dX = 0,21702 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\text{Pole podobszaru 2} = \int_0^{0,8} Y_2 * dX = 0,10767 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Dodano oba pola i obliczono wartość pola powierzchni odcisku w kształcie kropli:

$$P_k = P_{\text{podobszaru 1}} + P_{\text{podobszaru 2}} = 0,324087 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Aby otrzymać względny stopień pokrycia A_{rk} posłużono się tą samą procedurą jak dla odcisków sferycznych otrzymując:

$$A_{rk} = \frac{P_k}{90} * 100 \% = 4,68126 \%$$

WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Fotografie oraz profilogramy powierzchni po zatarciu przedstawiono w tab. 2. Na ich podstawie można stwierdzić, że największe ubytki materiału w postaci wyrwań występują na próbkach tylko szlifowanych (wariant I), zdecydowanie mniejsze na próbkach z wgłębieniami (wariant II i III).

W przyjętych warunkach tarcia próbki szlifowane ulegały zatarciu średnio po ok. 7 min, obrobione według wariantu II (nagniatanie udarowe - odciski sferyczne) średnio po ok. 44 min, a według wariantu III (nagniatanie udarowe - odciski w kształcie kropli)

średnio po ok. 37 min. Mechanizmem niszczenia było zacieranie adhezyjne, powodujące wyrwania materiału z przenoszeniem go na element współpracujący.

Tab. 2. Fotografie oraz profilogramy powierzchni po zatarciu

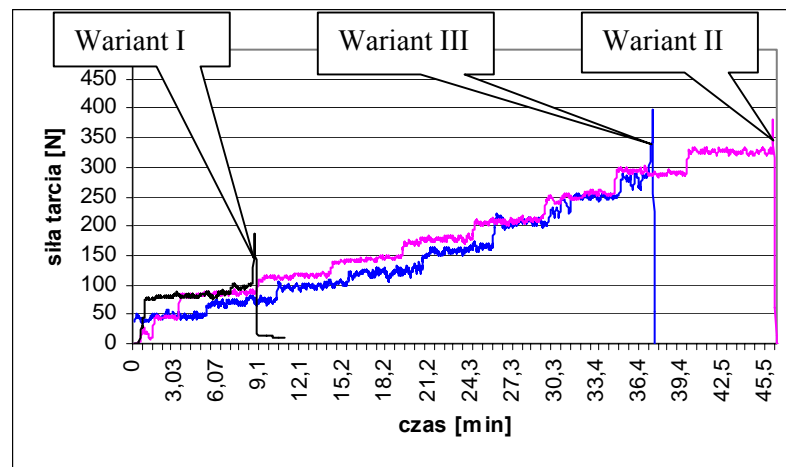
Wariant obróbki	Fotografia	Profilogram
Próbka szlifowana po zatarciu		
Próbka z odciskami sferycznymi po zatarciu		
Próbka z odciskami w kształcie kropli po zatarciu		
Przeciwp próbka po zatarciu z próbką szlifowaną		
Przeciwp próbka po zatarciu z próbką z odciskami sferycznymi		
Przeciwp próbka po zatarciu z próbką z odciskami w kształcie kropli		

Wykres zmian wartości siły tarcia w funkcji czasu do zatarcia dla poszczególnych wariantów par ciernych przedstawiono na rys. 4. Uzyskane wyniki wykazują istotny wpływ obróbki kształtującej próbkę na jej wartość i przebieg w zakresie badanych parametrów obciążenia. Zmiany oporu tarcia w badanych parach kinematycznych były następstwem zwiększonej intensywności szepiania i deformacji nierówności powierzchni współpracujących warstw wierzchnich, prowadzących do zatarcia. Podczas eksperymentu potwierdziła się teza o przeciwdziałaniu zacieraniu przez przerywanie styku tarcowego. Próbki z wgłębieniami sferycznymi przenosiły obciążenie jeszcze przy sile docisku 3000 N, średniej sile tarcia 320 N, zacierając się średnio w 44 minucie, pracowały więc ok. 6,3 razy dłużej w porównaniu ze szlifowanymi. Nieco krócej, bo średnio w 37 minucie pracy po dociśnięciu siłą 2700 N, przy średniej sile tarcia 290 N, zacierały się próbki z wgłębieniami w kształcie kropli, czyli były ok. 5,3

razy lepsze niż szlifowane. Próbkę z odciskami sferycznymi pracowały do zatarcia (przy większej sile docisku) średnio ok. 20% dłużej.

Zatem próbki z odciskami sferycznymi okazały się lepsze od próbek z odciskami w kształcie kropli. Wydaje się jednak, że ten rezultat nie jest wynikiem różnic w kształcie odcisków lecz wynikiem różnego uzyskanego stopnia pokrycia próbek śladami odcisków – względny udział wgłębień na powierzchni próbek był różny i wynosił w wariancie II: $A_{rs} = 9,388\%$, a w wariancie III $A_{rk} = 4,68126\%$. (to zagadnienie będzie przedmiotem dalszych badań)

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że znacznie lepsze wyniki w porównaniu z próbkami szlifowanymi uzyskano już przy stosunkowo małym stopniu pokrycia wgłębieniami (A_r poniżej 10%). Interesujące jest to z tego względu, iż literatura [4,5 i in.] podaje, że najlepsze wyniki odporności na zacieranie i ścieranie otrzymano przy stopniu pokrycia wgłębieniami w przedziale $A_r = 25-50\%$.

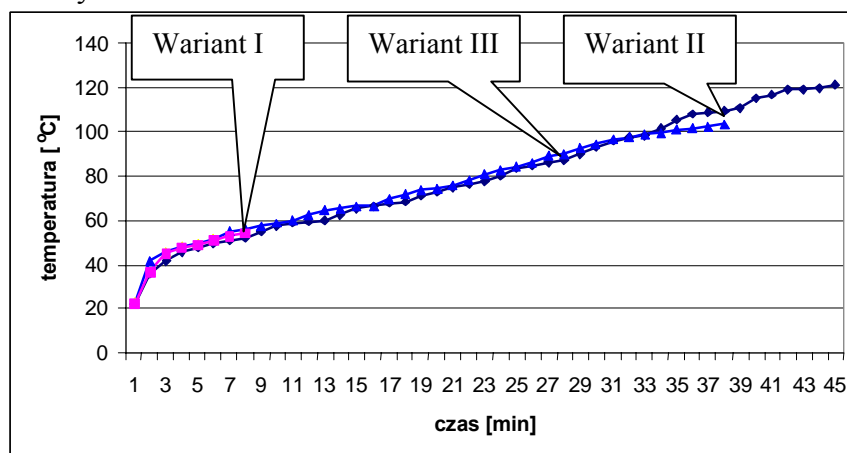


Rys. 4. Przykładowe aproksymowane wykresy siły tarcia do zatarcia próbek

Wykres zmian temperatury tarcia w funkcji czasu do zatarcia badanych skojarzeń przedstawiono na rys. 5.

Wyniki zarejestrowane podczas prób, pokazują wzrost temperatury w obszarze tarcia dla badanych par kinematycznych. Próbka szlifowana uległa zatarciu już przy temperaturze $T_{ZI} = 54^{\circ}\text{C}$, natomiast próbka z odciskami sferycznymi przy $T_{ZII} = 121^{\circ}\text{C}$, a z odciskami w kształcie kropli przy $T_{ZIII} = 103^{\circ}\text{C}$.

W badaniach nie stwierdzono wpływu stanu mikrosterometrii powierzchni na przebieg nagrzewania - we wszystkich wariantach pary ciernie nagrzewały się podobnie w zarejestrowanym zakresie.



Rys. 5. Zmiany temperatury badanych par ciernych w funkcji czasu

KONKLUZJE

Po analizie wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić, że mikrostereometria powierzchni trących skojarzeń stal–żeliwo pracujących w warunkach tarcia ślizgowego ze smarowaniem wywiera istotny wpływ na ich skłonności do zacierania. Stwierdzono korzystny wpływ wgłębień ukształtowanych w powierzchni próbek, gdyż:

1. Próbkę z wgłębieniami w powierzchni uległy zatarciu (w przyjętych warunkach pracy) przy sile tarcia ok. 300 N natomiast szlifowane przy sile ok. 100 N.
2. Odporność na zacieranie węzłów typu stal–żeliwo znacząco poprawiła się już przy stopniu pokrycia wgłębieniami poniżej 10%.

Nie stwierdzono natomiast czy o zmianie właściwości przeciwzatarciowych decydowały kształty kieszeni smarnych czy raczej różny stopień pokrycia powierzchni próbek badanych jednoimiennych par ciernych.

Jednak, poprzez zastosowanie nagniatania udarowego stalowych czopów można w sposób istotny poprawić odporność na zacieranie tzn. zwiększyć dopuszczalne, bezpieczne obciążenie skojarzeń jednoimiennych pracujących w warunkach tarcia ślizgowego i smarowania olejem L-AN 46.

LITERATURA

- [1] Nosal S.: Zasady kształtowania odporności na zacieranie adhezyjne żelaznych skojarzeń ślizgowych. XXIII Jesienna Szkoła Trybologiczna, Zielona Góra-Lubiatów 1999.
- [2] Sniegowski F. P.: Teorija termouprugohidrodinamicieskoj smazki (teorija TUG-DS) – osnowa sozdanija progiessiwnych tribosistem maszin. Sbornik w Maszynostrojenii, Priborostrojenii, 2004/2, Ukraina.
- [3] Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. WNT, Warszawa 1987.
- [4] Koszela W.: Nagniatanie impulsowe powierzchni walcowych pracujących w warunkach tarcia. Praca doktorska, Politechnika rzeszowska, Rzeszów 2003.
- [5] Czarnecki H.: Wpływ nagniatania oscylacyjnego na niektóre własności warstwy wierzchniej stali 55. Praca doktorska, Częstochowa 1983.
- [6] Stadnicka D.: Wpływ nagniatania udarowego na właściwości warstwy wierzchniej stali. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2004.

THE INFLUENCE OF SURFACE MICROGEOMETRY IN SLIDE BEARINGS ON RESISTANCE TO SEIZING

Summary: The article describes the influence of surface with pits on resistance to seizing of a steel - cast iron pair working in slide friction conditions. It introduces the method of calculating the degree of covering surface with regular pits of various shape after percussive burnishing. The authors present the results of tests on resistance to seizing pair: steel 40HM and cast iron EN-GJS-400-15.