

JANUSZ LUBAS*

**WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE WARSTWY
WIERZCHNIEJ STALI MODYFIKOWANEJ BOREM
W WARUNKACH TARCIA MIESZANEGO****TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE
LAYER OF THE STEEL MODIFIED WITH BORON UNDER
MIXED FRICTION CONDITIONS****Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań porównawczych par ślizgowych z warstwami powierzchniowymi modyfikowanymi borem. Warstwy te wykonano na próbkach pierścieniowych w procesach borowania proszkowego, ulepszania cieplnego stali zawierającej bor 30MnB4, borowania laserowego oraz powłoki TiB_2 metodą PVD. Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze typu rolka-kłosek. Przeciwpróbki wykonano ze stopu łożyskowego AlSn20, a układ smarowano olejem silnikowym Lotos mineralny 15W/40. Badania potwierdziły możliwość zastosowania warstw modyfikowanych borem w parach pracujących w warunkach tarcia ślizgowego. Zastosowanie borowania proszkowego i stali z zawartością boru z ulepszeniem cieplnym w parze ślizgowej generuje parametry tarcia i zużycie na poziomie próbek azotowanych.

Słowa kluczowe: zużycie, obróbka powierzchniowa, bor, tarcie ślizgowe

Abstract

The paper present the results of test sliding pairs with surface layers modified by boron. The ring specimens produce from 46Cr2 steel. The layers was made by nitrogen hardening, powder pack boronizing, laser boronizing, heat treatment steel 30MnB4 including boron and PVD process TiB_2 . The tribological test was performed on a block on ring wear tester with a lubricant Lotos mineral oil. Counter body was cut out AlSn20 bearing alloy. The tests confirmed possibility use layers with boron in sliding pair worked under mixed friction. The used layers powder borided and heat treatment steel with boron generated friction parameters and wear on the level of nitrogen hardening samples.

Keywords: wear, surface treatment, boron, sliding friction

* Dr inż. Janusz Lubas, Instytut Techniki, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski.

1. Wstęp

Ślizgowe węzły tarcia jako struktury tribologiczne są funkcją materiałów konstrukcyjnych i zastosowanych w procesie wytwarzania technologii. Właściwości tribologiczne węzła trącego są wypadkową konstrukcji węzła i właściwości współpracujących powierzchni, a pośrednio stanu warstwy wierzchniej elementów węzła cierne. Stan warstwy wierzchniej można konstituować w procesach technologicznych poprzez dobór odpowiednich materiałów na te elementy i technologii ich obróbki powierzchniowej. Prawidłowo ukształtowana warstwa wierzchnia zapewnia optymalne właściwości tribologiczne w czasie eksploatacji, a tym samym trwałość i niezawodność konstrukcji. Ze względu na różnorodność warunków pracy, obciążenie węzłów ślizgowych i rodzaju występującego zużycia istotny jest wybór rodzaju obróbki powierzchniowej. Obecnie znanych jest wiele metod wytwarzania warstw powierzchniowych chroniących przed zużyciem tribologicznym [1, 2]. Z dużej liczby procesów obróbki powierzchniowej stosowanych do poprawy właściwości tribologicznych korzystne właściwości wykazują warstwy powierzchniowe modyfikowane borem. Stosowane obecnie procesy modyfikacji borem pozwalają uzyskać warstwy powierzchniowe o dużej twardości, odporności na zużycie i korozję, przy niskiej kruchości i braku skłonności do pęknięcia [3]. Jednak cechy eksploatacyjne tych warstw zależą od składu chemicznego, struktury warstwy wierzchniej, metody i parametrów procesów ich wytwarzania i ewentualnej obróbki cieplnej. Modyfikacja warstwy wierzchniej borem powinna być dobierana w zależności od wymaganych własności eksploatacyjnych i warunków pracy elementów maszyn [4–7].

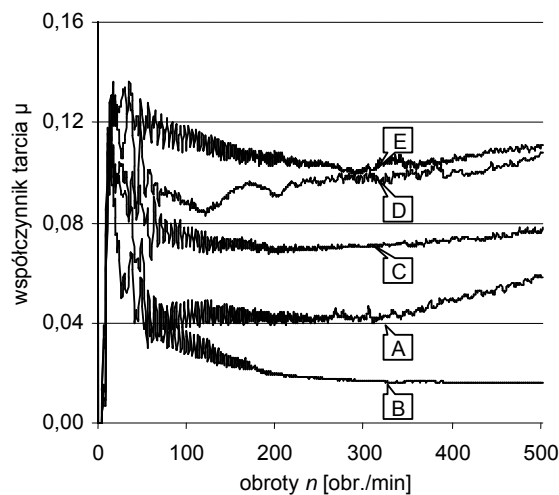
2. Opis badań

Celem artykułu jest określenie wpływu technologicznie ukształtowanych warstw powierzchniowych czopa na parametry tarcia w węźle ślizgowym w warunkach tarcia mieszanego. Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze produkcji MCNEMT w Radomiu typu T-05. Do realizacji programu badań wykonano próbki pierścieniowe z warstwami powierzchniowymi: borowanymi w proszku, borowanymi laserowo i z powłoką TiB_2 uzyskaną metodą PVD. Warstwy te wytworzono próbkach ze stali 46Cr2. Wykonano również próbki pierścieniowe z warstwą powierzchniową ulepszoną cieplnie (stal z dodatkiem boru 30MnB4) i azotowaną jonizacyjnie na próbkach ze stali 38HMJ. Próbkę te podczas prób współpracowały z wycinkiem panwi wykonanych ze stopu łożyskowego AlSn20. Badane pary kinematyczne smarowano podczas testu olejem silnikowym Lotos mineralny 15W/40.

3. Wyniki badań

W warunkach tarcia mieszanego współpracę węzła ślizgowego charakteryzuje duża dynamika zmian wartości mierzonych parametrów pod wpływem zewnętrznych wymuszeń. Określenie tendencji tych zmian jest szczególnie istotne w czasie rozruchu pary ciernej. Ocena zachodzących zmian jest możliwa poprzez rejestrację siły tarcia. Badania te zrealizowano, rozpędzając czop od 0 do 500 obr./min w czasie $t = 30$ s. Zarejestrowane wykresy

przedstawiają typowe przebiegi siły tarcia dla par ciernych pierścieni–klocki przy obciążeniu 20 MPa w warunkach rozruchu maszyny (rys. 1).

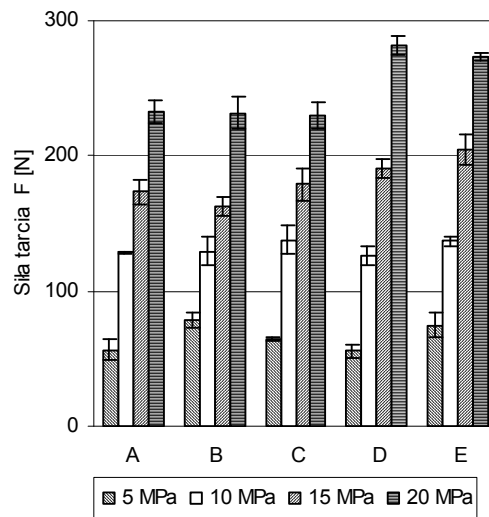


Rys. 1. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na zmianę współczynnika tarcia w funkcji prędkości obrotowej, przy obciążeniu 20 MPa; A – azotowanie, B – borowanie w proszku, C – ulepszanie cieplne, D – TiB₂, E – borowanie laserowe

Fig. 1. Influence of surface treatment ring sample on change of friction coefficient vs. rotation speed and load 20 MPa; A – nitrogen hardening, B – powder pack boronizing, C – heat treatment, D – TiB₂, E – laser boronizing

Pomiary wykazały, że istnieje duża zależność przebiegu współczynnika tarcia od ukształtowanej warstwy powierzchniowej czopa. Podczas rozruchu pary cierniej następuje gwałtowny wzrost oporu tarcia, a następnie jego spadek. Rejestrowane przebiegi współczynnika tarcia dla wyższych prędkości obrotowych są zróżnicowane. Obserwuje się pary kinematyczne, w których wzrost wartości współczynnika tarcia następuje wraz ze wzrostem prędkości obrotowej próbki pierścieniowej. Zmiany te występują w parach z warstwami powierzchniowymi azotowanymi i borowanymi laserowo po przekroczeniu 300 obr./min, a dla pary z powłoką TiB₂ po przekroczeniu 100 obr./min. Dla innych par kinematycznych wzrost prędkości obrotowej prowadzi do stabilizacji wartości współczynnika tarcia w badanym zakresie prędkości obrotowej. Trend ten obserwowany jest dla par z czopem ze stali 30 MnB₄ po ulepszaniu cieplnym. W trzeciej grupie par kinematycznych współczynnik tarcia zmniejszają się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej próbki pierścieniowej. Zmiany te zarejestrowano dla pary z warstwą powierzchniową borowaną w proszkach. Obserwacja tych zmian w okresie rozruchu wnosi informacje o zachowaniu się układu w czasie dalszej jego pracy. Najkorzystniejsze warunki pracy występują w parach kinematycznych, w których po wzroście współczynnika tarcia w początkowym etapie rozruchu następuje jego znaczne obniżenie i stabilizacja na stałym poziomie. W takich parach w tym krótkim czasie następuje ukształtowanie równowagi tribochemicznej, co zapewnia optymalne warunki do pracy układu. Zarejestrowane zmiany są wynikiem fizykochemicznych pro-

cesów i zmian mikrogeometrii powierzchni tarcia w wyniku adaptacji systemu do warunków wymuszeń zewnętrznych.



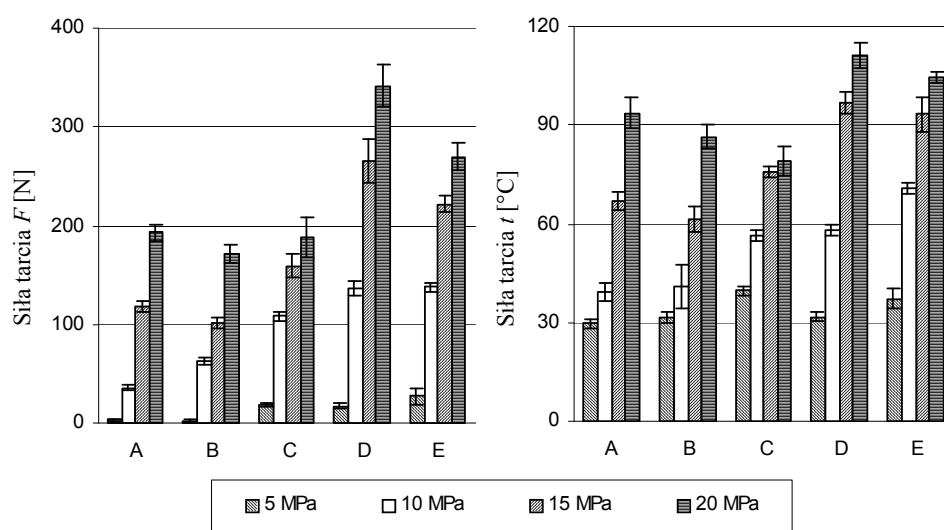
Rys. 2. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na siłę tarcia w momencie rozruchu w funkcji obciążenia pary kinetycznej; A – azotowanie, B – borowanie w proszku, C – ulepszenie cieplne, D – TiB_2 , E – borowanie laserowe

Fig. 2. Influence of surface treatment ring sample on friction force in function load of kinematics pair; A – nitrogen hardening, B – powder pack boronizing, C – heat treatment, D – TiB_2 , E – laser boronizing

W parach ślizgowych istotnym zagadnieniem jest wyznaczenie wartości maksymalnego momentu rozruchowego. W celu określenia tej wielkości zarejestrowane zostały wartości siły tarcia w chwili startu pary ciernej w funkcji ukształtowania warstwy powierzchniowej czopa i obciążenia pary kinematycznej (rys. 2). Zarejestrowane wyniki siły tarcia potwierdziły wzrost jej wartości wraz ze wzrostem obciążenia badanej pary. W warunkach tarcia mieszanego najniższe opory rozruchu obserwuje się dla par z warstwą powierzchniową azotowaną, borowaną proszkowo i ulepszoną cieplnie. Rejestrowane opory tarcia są zbliżone co do wartości i dotyczy to całego zakresu obciążenia badanego układu. Istotne zmiany oporów tarcia występują dla par z czopami z powłoką TiB_2 i warstwą borowaną laserowo. W przypadku tych warstw powierzchniowych obserwuje się wzrost oporów tarcia o 20%.

W celu wyznaczenia wpływu modyfikacji warstwy powierzchniowej na warunki tarcia w parze ślizgowej przeprowadzono badania dla założonych warunków obciążenia; stała prędkość obrotowa czopa $n = 100$ obr./min i zmienne naciski jednostkowe $p = 5\text{--}20$ MPa. Na podstawie przebiegów siły tarcia i temperatury dla ustalonych warunków pracy pary ciernej wyznaczono wartości momentu tarcia i temperatury w zależności od sposobu modyfikacji warstwy powierzchniowej czopa i obciążenia pary kinematycznej (rys. 3). Większość badanych warstw powierzchniowych (azotowana, borowana w proszku, ulepszana cieplnie) wykazuje zbliżony poziom wartości oporów tarcia. Również wartości temperatury

są porównywalne, ale najniższą zmierzono dla pary z warstwą ulepszaną cieplnie. Największe opory tarcia zmierzono w parze z powłoką TiB_2 , a ich wartość jest o 70% większa w stosunku do wymienionych powyżej par badanych. Zastosowanie w parze próbki pierścieniowej z warstwą borowaną laserowo wykazują wzrost oporów o około 40%. Zmierzona temperatura w obszarze tarcia dla tych par jest najwyższa i przekracza $100^\circ C$.

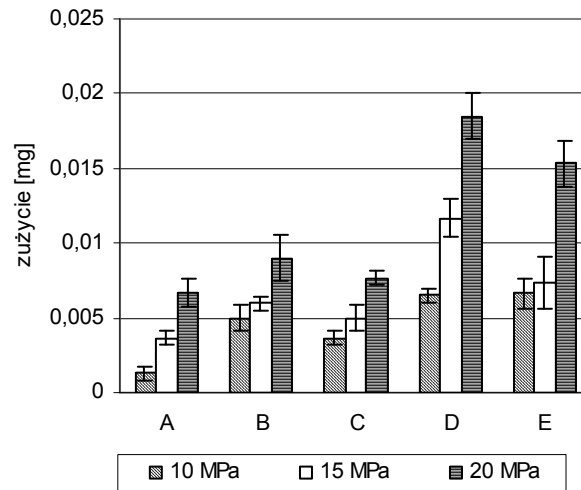


Rys. 3. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na siłę tarcia i temperaturę w funkcji obciążenia pary kinetycznej przy 100 obr./min czopa: A – azotowanie, B – borowanie w proszku, C – ulepszanie cieplne, D – TiB_2 , E – borowanie laserowe

Fig. 3. Influence of surface treatment ring sample on friction forces and temperature depending on normal load and rotation speed 100 rpm; A – nitrogen hardening, B – powder pack boronizing, C – heat treatment, D – TiB_2 , E – laser boronizing

Pomiar zużycia stopu łożyskowego wykazał najniższe wartości zużycia dla par z warstwami powierzchniowymi azotowanymi, borowanymi w proszku i ulepszanych cieplnie. Wielkość zużycia w tych parach nie przekracza 0,01 mg masy stopu łożyskowego, a rozrzut wartości zużycia dla tych par nie przekracza 20%. W parach z powłoką TiB_2 i z warstwą borowaną laserowo zużycie stopu łożyskowego jest prawie dwukrotnie wyższe. Zmiany te są efektem oddziaływania współpracujących warstw powierzchniowych na siebie i występowaniem zjawisk fizykochemicznych w obszarze styku pod wpływem wymuszeń zewnętrznych. Istotne znaczenie odgrywa tutaj oddziaływanie czynnika smarnego, który, ulegając przemianom tribochemicznym, może tworzyć korzystne lub niekorzystne warunki tarcia.

Zmiany te w oleju prowadzą do powstawania warstw granicznych o dużej odporności na przerywanie lub ulegające szybkiemu zniszczeniu, co ułatwia kontakt wierzchołków nierówności współpracujących warstw powierzchniowych. W warunkach tarcia występowało przenoszenie materiału panwi na powierzchnie czopa, co mogło intensyfikować proces zużycia szczególnie w przypadku powłoki TiB_2 . Zużycie stopu łożyskowego w parze z warstwą borowaną laserowo wynika z uzyskanej niejednorodności warstwy powierzchniowej.



Rys. 4. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na zużycie wagowe stopu łożyskowego AlSn20 w funkcji obciążenia pary kinetycznej: A – azotowanie, B – borowanie w proszku, C – ulepszenie cieplne, D – TiB₂, E – borowanie laserowe

Fig. 4. Influence of surface treatment ring sample on wear of AlSn20 bearing alloy under various load conditions: A – nitrogen hardening, B – powder pack boriding, C – heat treatment, D – TiB₂, E – laser boronizing

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych i analizy ich wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Zastosowane technologie modyfikacji warstwy powierzchniowej stalowej próbki pierścieniowej borem umożliwiają wytworzenie warstw wierzchnich, o ustalonej właściwościach tribologicznych, wymaganych dla elementów węzła ślizgowego pracującego w warunkach tarcia mieszanego.
2. Zastosowanie borowania w proszku wpływa korzystnie na parametry tribologiczne pary cieiernej i osiąga zbliżone warunki pracy do pary z warstwą azotowaną. Wielkość zużycia stopu łożyskowego i opory tarcia mają porównywalne wartości.
3. Największe zużycie stopu łożyskowego generuje zastosowanie w parze ślizgowej powłoki TiB₂ i warstwy powierzchniowej borowanej laserowo.

Literatura

- [1] Nakoneczny A., *Powierzchniowe obróbki wyrobów metalowych*, IMP, Warszawa 2000.
- [2] Kula P., *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Politechnika Łódzka, Łódź 2000.

- [3] Przybyłowicz K., *Teoria i praktyka borowania stali*, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2000.
- [4] Pertek A., *Kształtowanie struktury i właściwości warstw borków żelaza otrzymanych w procesie borowania gazowego*, Rozprawy nr 365, Politechnika Poznańska, Poznań 2001.
- [5] Martini C., Palombarini G., Poli G., Prandstraller D., *Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings*, Wear, Vol. 256, 2004, 608-613.
- [6] Steinmann M., Muller A., Meerkamm H., *A new type of tribological coating for machine elements based on carbon, molybdenum disulphide and titanium diboride*, Tribology International, Vol. 37, 2004, 879-885.
- [7] Taktak S., *Tribological behaviour of borided bearing steel at elevated temperature*, Surface & Coating Technology, Vol. 201, 2006, 2230-2239.