

Janusz LUBAS*

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE WARSTWY WIERZCHNIEJ Z BOREM W WARUNKACH TARCIA ŚLIZGOWEGO

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE SURFACE LAYER WITH BORON UNDER SLIDING FRICTION CONDITIONS

Słowa kluczowe:

tarcie ślizgowe, zużycie, obróbka powierzchniowa, bor

Key-words:

sliding friction, wear, surface treatment, boron

Streszczenie

Właściwości tribologiczne par ciernych zależą od ich konstrukcji, zastosowanych materiałów i przeprowadzonej obróbki powierzchniowej elementów pary. Celem badań było wyznaczenie wpływu modyfikacji warstwy powierzchniowej elementów stalowych borem w parach pracujących w warunkach tarcia ślizgowego. Badania porównawcze

* Uniwersytet Rzeszowski, Instytut Techniki, Al. Rejtana 16A, 35-959 Rzeszów, tel. (0-17) 872-11-86; e-mail: janas@univ.rzeszow.pl

przeprowadzono na testerze T-05 typu rolka–klocek. W celu realizacji programu badań wykonano próbki pierścieniowe z trzech gatunków stali: 38CrAlMo5-10, 46Cr2 i 30MnB4. Próbki te azotowano jonowo, borowano w proszku, borowano laserowo oraz metodą PVD wykonano powłokę TiB₂. Próbki pierścieniowe skojarzone zostały w warunkach testu z przeciwpróbkami wykonanymi ze stopu łożyskowego AlSn20, a obszar tarcia smarowano olejem silnikowym Lotos mineralny 15W/40. Przeprowadzone badania wykazały, że warstwy powierzchniowe borowane w proszku wpływają na obniżenie współczynnika tarcia podczas rozruchu, a jego maksymalne wartości są zbliżone do zmierzonych w skojarzeniach z warstwami azotowanymi i ulepszanymi cieplnie ze stali 30MnB4. Największe wartości współczynnika tarcia i najwyższe temperatury w obszarze tarcia występują w parach z próbkami pierścieniowymi z warstwą borowaną laserowo i z powłoką TiB₂. Zużycie stopu łożyskowego AlSn20 jest największe w skojarzeniu z przeciwpróbką z powłoką TiB₂, a najniższe zużycie zmierzono w skojarzeniach z warstwami azotowanymi i ulepszanymi cieplnie.

WPROWADZENIE

Warstwa powierzchniowa elementów maszyn jest narażona na wysokie obciążenia dynamiczne i statyczne, działanie czynników korozyjnych, cieplnych oraz na zmęczenie i zużycie. Ponad 90% uszkodzeń elementów maszyn inicjowanych jest w warstwie wierzchniej. Modyfikacja warstwy powierzchniowej wpływa na zwiększenie odporności na uszkodzenie w wyniku wytworzenia twardej i odpornej warstwy wierzchniej na miękkim i ciągliwym rdzeniu. Do najczęściej wykorzystywanych metod modyfikacji warstwy powierzchniowej zalicza się obróbki cieplne i cieplno-chemiczne. W procesach obróbki cieplno-chemicznej poprzez dyfuzję wprowadza się do obrabianego stopu np. bor, co pozwala na uzyskanie warstwy wierzchniej o dużej twardości (powyżej 2000 HV), znacznej odporności na korozję i zużycie ściernie [L. 1, 2]. Proces borowania prowadzony jest w ośrodkach zawierających bor w temperaturze od 850 do 1000°C przez 2–10 h, a wytworzona warstwa składa się z jednej fazy FeB lub FeB₂ albo ma strukturę dwufazową (dwie strefy FeB i FeB₂) [L. 3]. Właściwości tribologiczne uzyskanej warstwy zależą od udziału boroków FeB i FeB₂, zastosowanych materiałów boronośnych, temperatury borowania, czasu obróbki i gatunku borowanego materiału [L. 4]. Borowanie

stosuje się dla materiałów żelaznych i nieżelaznych, ale wysokiej jakości warstwy uzyskuje się głównie w przypadkach żeliw ciągliwych i niskostopowych stali chromowych [L. 5, 6].

W ostatnich dwóch dekadach szeroko stosuje się materiały ceramiczne o wyjątkowych kombinacji właściwości, jak niska gęstość, wysoka oporność na korozję, mała rozszerzalność cieplna, wysoka twardość w szerokim zakresie temperatury i duża odporność na zużycie. Do tej grupy materiału należy TiB_2 , który charakteryzuje się wysoką twardością, wysoką temperaturą topnienia, dużą odpornością chemiczną i dobrą odpornością na zużycie ściernie [L. 7, 8]. Pozwala to na zastosowanie tego materiału w wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych narażonych na procesy zużycia tribologicznego.

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 [L. 9]. Jednak cechy eksploatacyjne tych warstw zależą od składu chemicznego, struktury warstwy wierzchniej, metody wytwarzania, parametrów tego procesu i ewentualnej obróbki cieplnej. Na proces wytwarzania warstw wierzchnich z borem wpływają czynniki związane z procesem eksploatacji węzła ciernego [L. 2, 10]. Dlatego istotne jest określenie, jak ukształtowanie warstwy powierzchniowej z borem modeluje warunki pracy i trwałość węzła ciernego.

OPIS BADANIA

Celem badań było wyznaczenie wpływu technologicznie ukształtowanych warstw powierzchniowych z borem na parametry tarcia w węźle ślizgowym. Badania tribologiczne przeprowadzono na testerze T-05 typu rolka-kłosek. Dla realizacji programu badań wykonano próbki pierścieniowe z trzech gatunków stali: 38CrAlMo5-10, 46Cr2 i 30MnB4. Próbki ze stali 38CrAlMo5-10 azotowano jonowo w atmosferze $H_2 + N_2$, w temperaturze $500^\circ C$ i czasie 6 h. Do obróbki próbek ze stali 46Cr2 zastosowano borowanie w proszku, borowanie laserowe i metodę PVD. Proces borowania w proszku (B_4C -30%, Al_2O_3 -68%, NH_4Cl i NaF) przeprowadzono w temperaturze $950^\circ C$, w czasie 8 h. Po procesie borowania próbki hartowano izotermicznie. Borowanie laserowe wykonano laserem CO_2 . Próbki pokryte mieszaniną boru amorficznego ze szkłem wodnym przetopiono wiązką laserową (moc wiązki $P = 2$ kW, średnica plamki $d = 4$ mm,

gęstość mocy 160 W/mm^2 , prędkość obróbki $v = 16 \text{ mm/s}$, pokrycie ścieżek $f = 0,5 \text{ mm}$) w ochronie argonu. Metodę PVD zastosowano do nałożenia powłoki TiB_2 (temperatura 400°C , czas 40 minut, ciśnienie w komorze jonizacyjnej $p = 2,5 \times 10^{-2}$ bara). Próbki pierścieniowe ze stali 30 MnB4 (0,0025–0,004% B) ulepszano cieplnie (temperatura hartowania 800°C , temperatura odpuszczania 450°C). Próbki pierścieniowe skojarzone zostały w warunkach testu z przeciwpróbkami wykonanymi ze stopu łożyskowego AlSn20, a obszar tarcia smarowano olejem silnikowym Lotos mineralny 15W/40.

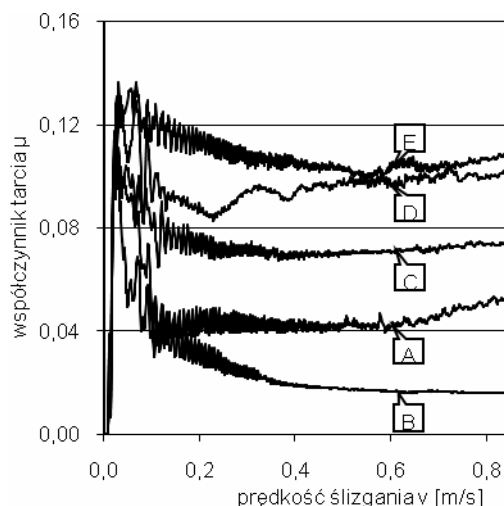
Badania miały charakter porównawczy i przeprowadzono go według określonego algorytmu, obejmującego wstępne docieranie próbek oraz właściwy proces współpracy przy założonych parametrach obciążenia. W badaniach w cyklu rozruchu para ślizgowa była rozpędzana od prędkości $n = 0$ do 500 obr./min w czasie $\tau = 30 \text{ s}$, przy nacisku jednostkowym $p = 20 \text{ MPa}$. Podczas rozruchu realizowano pomiary współczynnik tarcia i temperatury w obszarze tarcia. W ustalonych warunkach obciążeniu pary czarnej (przy prędkości obrotowej próbki pierścieniowej $n = 100 \text{ obr./min}$) wykonano pomiary współczynnika tarcia, temperatury w obszarze styku i zużycia masowego w funkcji nacisków jednostkowych (5, 10, 15 i 20 MPa), w czasie trwania próby $\tau_u = 500 \text{ s}$.

WYNIKI BADAŃ

Współpracę węzła ciernego charakteryzuje duża dynamika zmian wartości mierzonych parametrów pod wpływem zewnętrznych wymuszeń. Określenie tendencji tych zmian jest szczególnie istotne w czasie rozruchu pary czarnej (**Rys. 1**). Zarejestrowane wykresy przedstawiają typowe przebiegi zmian współczynnika tarcia dla par ciernych typu pierścienkoczek przy obciążeniu 20 MPa , w warunkach rozruchu węzła ciernego.

Podczas pierwszej fazy rozruchu pary ślizgowej następuje gwałtowny wzrost oporu tarcia, a następnie istotny jego spadek. Rejestrowane przebiegi zmian współczynnika tarcia dla wyższej prędkości ślizgania są zróżnicowane. W parach z warstwami powierzchniowymi azotowanymi i borowanymi laserowo po przekroczeniu prędkości ślizgania $0,6 \text{ m/s}$, a w parach z powłoką TiB_2 po przekroczeniu $0,2 \text{ m/s}$ występuje wzrost wartości współczynnika tarcia. Uzyskany poziom wartości współczynnika tarcia w skojarzeniach z warstwą borowaną laserowo i z powłoką TiB_2 wynosi około 0,11. W innych parach wzrost prędkości ślizgania prowadzi do stabi-

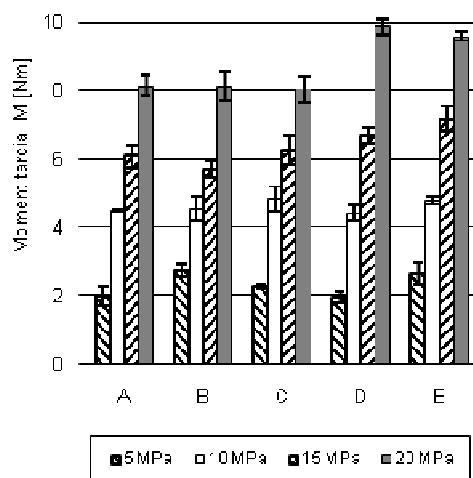
lizacji wartości współczynnika tarcia, co zaobserwowano w parach z próbką ze stali 30MnB4 po ulepszeniu cieplnym. Zaś w parach z warstwą powierzchniową borowaną w proszkach obserwowano spadek wartości współczynnika tarcia ze wzrostem prędkości ślizgania próbki pierścieniowej i najniższy poziom wartości współczynnika tarcia ($\mu = 0,02$).



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 – ulepszenie cieplne, D – TiB_2 , E – borowanie laserowe

Fig. 1. Influence of surface treatment annular sample on change of friction coefficient vs. rotation speed and load 20 MPa; A – nitrogen hardening, B – powder pack boronizing, C – quenched and tempered, D – coating TiB_2 , E – laser boronizing

W parach ślizgowych istotnym zagadnieniem jest wyznaczenie wartości maksymalnego momentu rozruchowego (**Rys. 2**). Najniższy moment tarcia podczas rozruchu zarejestrowano w parach z warstwą powierzchniową azotowaną, borowaną proszkowo, ulepszaną cieplnie i wynosi on około 8 Nm (przy 20 MPa). Istotny wzrost wartości momentu tarcia o około 20% występuje w parach z próbkami pierścieniowymi z powłoką TiB_2 i warstwą borowaną laserowo. Podobne tendencje zmian oporów tarcia obserwuje się również w zakresie nacisków 10 i 15 MPa. Przy małych naciskach jednostkowych (5 MPa) pary z warstwami azotowanymi, ulepszanymi cieplnie i z powłoką TiB_2 osiągają poziom



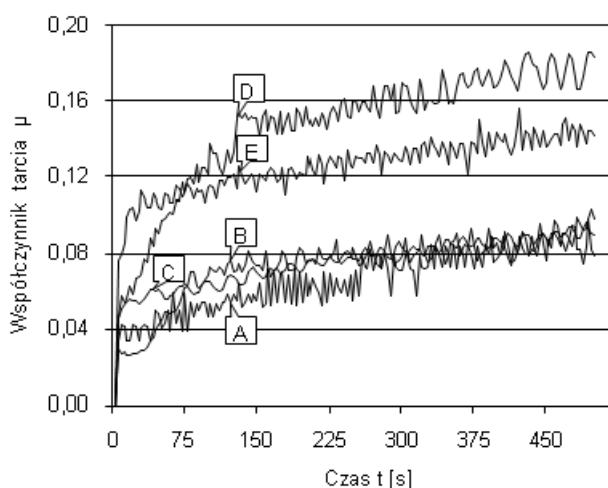
Rys. 2. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na moment rozruchu pary ślizgowej, A – azotowanie, B – borowanie w proszku, C – ulepszenie cieplne, D – TiB_2 , E – borowanie laserowe

Fig. 2. Influence of surface treatment annular sample on moment of friction of sliding pair; A – nitrogen hardening, B – powder pack boronizing, C – quenched and tempered, D – TiB_2 , E – laser boronizing

wartości momentu tarcia około 2 Nm. Natomiast w skojarzeniach z warstwami borowanymi w proszku i laserowo uzyskany opór tarcia jest wyższy o 15%. Obserwacja zmian parametrów tarcia w okresie rozruchu informuje o prawdopodobnym zachowaniu się układu w czasie dalszej jego pracy. Najkorzystniejsze warunki pracy występują w parach ślizgowych, w których po wzroście współczynnika tarcia w początkowym etapie rozruchu następuje jego znaczne obniżenie i stabilizacja na pewnym poziomie. Wartość momentu rozruchowego decyduje o zapotrzebowaniu energetycznym układu kinematycznego w chwili jego uruchomienia. Natomiast w parach, w których w tym czasie następuje ukształtowanie równowagi tribochemicznej, powstają optymalne warunki do pracy układu. Zarejestrowane zmiany są wynikiem fizykochemicznych procesów i zmian mikrogeometrii powierzchni tarcia w wyniku adaptacji systemu do warunków wymuszeń zewnętrznych [L. 11, 12]. W węzłach ciernych, w których występuje znaczny spadek współczynnika tarcia, o poprawie warunków tarcia decyduje wzrost efektywności smarowania w wyniku zaistniałych zmian tribochemicznych w oleju. Zmiany te kształtowane są

przez istniejący stan obciążenia pary ślizgowej, poziom temperatury i reakcje chemiczne zachodzące w obszarze tarcia. W wyniku zmian składu chemicznego oleju oraz powstawania nowych związków tworzy się warstwa graniczna, która zmieniając strukturę warstwy przeciwzużyciowej powoduje jej umocnienie i obniżenie oporów ruchu. Powstała warstwa wpływa na stabilizację lub zwiększenie obszarów, w których występują mikrokliny smarne. Zmiany te prowadzą do dalszego obniżenia oporów tarcia przy wzroście prędkości ślizgania próbki pierścieniowej [L. 11, 12]. W parach o stabilnym przebiegu współczynnika tarcia w funkcji prędkości ślizgania próbki pierścieniowej, warstwa powierzchniowa tego elementu zapewnia takie właściwości ślizgowe, które umożliwiają równowagę zachodzących zjawisk tribochemicznych w obszarze styku. Dzięki tej równowadze istnieje możliwość samoregulacji procesów zachodzących w obszarze tarcia, co wpływa na stabilizację oporów ruchu, pomimo wzrostu prędkości ślizgania próbki pierścieniowej.

W celu określenia wpływu czasu trwania próby na proces tarcia wykonano pomiar współczynnika tarcia w ustalonych warunkach obciążenia (Rys. 3). W skojarzeniach z warstwami azotowanymi, borowanymi

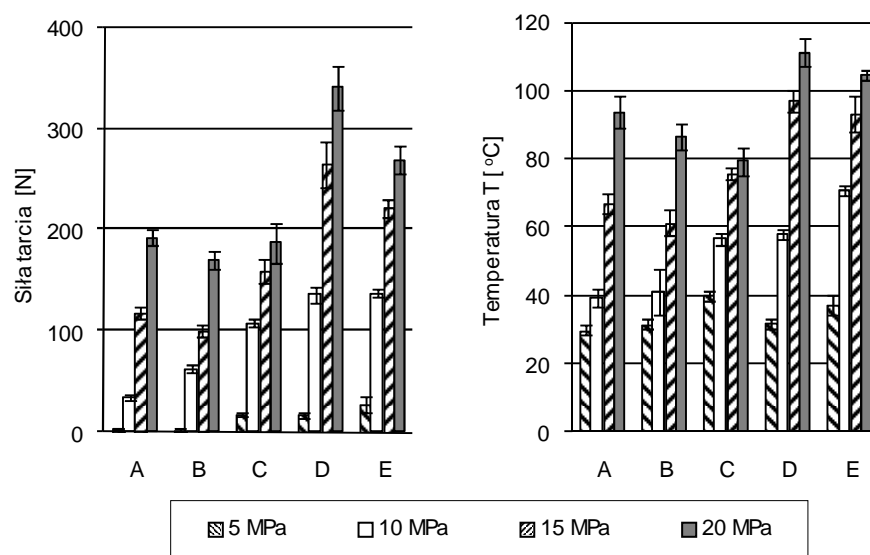


Rys. 3. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na zmiany współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania próby ($p = 20$ MPa, $n = 100$ obr./min); A – azotowanie, B – borowanie w proszku, C – ulepszenie cieplne, D – TiB_2 , E – borowanie laserowe

Fig. 3. Influence of surface treatment annular sample on friction coefficient depending on time of test ($p = 20$ MPa, $n = 100$ rpm); A – nitrogen hardening, B – powder pack boronizing, C – quenched and tempered, D – TiB_2 , E – laser boronizing

w proszku i ulepszanymi cieplnie obserwuje się zbliżony charakter zmian współczynnika tarcia. Po początkowych różnicach w wartości współczynnika tarcia, po przekroczeniu 300 s współpracy, poziom i charakter zmian jest jednakowy, a wartość współczynnika tarcia wynosi około 0,09. W przypadku pozostałych skojarzeń obserwuje się istotny wzrost oporów tarcia i w parach z próbką pierścieniową borowaną laserowo wartość współczynnika tarcia wynosi około 0,15, a w parach ślizgowych z powłoką TiB_2 w przybliżeniu 0,17.

Istotne zmiany wartości siły tarcia i temperatury w obszarze tarcia występują pod wpływem zmiany nacisków jednostkowych $p = 5, 10, 15, 20$ MPa (**Rys. 4**). W większości badanych par ślizgowych z warstwami powierzchniowymi (azotowana, borowana w proszku, ulepszana cieplnie) poziom wartości siły tarcia jest zbliżony i nie przekracza wartości 200 N (przy 20 MPa). Natomiast w parach z warstwami borowanymi laserowo wynosi 270 N, a w parach z powłoką z TiB_2 osiąga poziom 341 N. Przy



Rys. 4. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na siłę tarcia i temperaturę dla różnych wartości obciążenia pary ślizgowej przy 100 obr./min: A – azotowanie, B – borowanie w proszku, C – ulepszanie cieplne, D – TiB_2 , E – borowanie laserowe

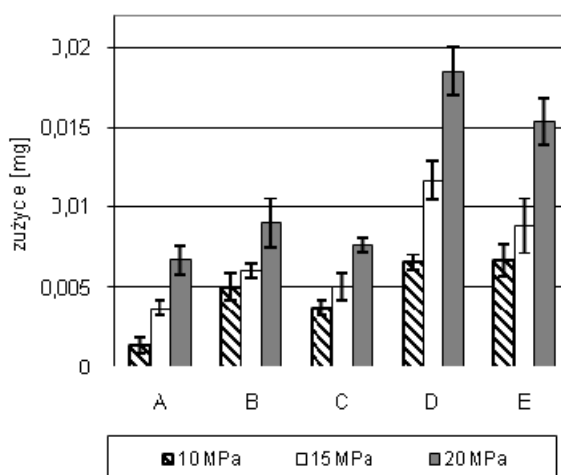
Fig. 4. Influence of surface treatment annular sample on friction forces and temperature depending on load and rotation speed 100 rpm annular sample; A – nitrogen hardening, B – powder pack boronizing, C – quenched and tempered, D – TiB_2 , E – laser boronizing

najmniejszych wartościach nacisku jednostkowego (5 MPa) najniższe wartości siły tarcia zmierzono w parach z warstwami azotowanymi i borowanymi w proszku. Wzrost obciążenia do 10 MPa spowodował zwiększenie siły tarcia o około 50% w parach z warstwą borowaną w proszku w stosunku do par z warstwą azotowaną. Dalszy wzrost nacisku do 15 MPa w parze z warstwą borowaną w proszku wpływa na zmniejszenie tendencji do wzrostu siły tarcia. W parach z warstwami ulepszanymi cieplnie, borowanymi laserowo i z powłoką TiB_2 poziom i intensywność zmian siły tarcia w zakresie nacisku od 5 do 10 MPa jest zbliżony. Pomiarów temperatury w obszarze tarcia po zakończeniu prób wykazały najniższą wartość w parach z warstwą ulepszaną cieplnie (poniżej $80^\circ C$). Najwyższe wartości temperatury wystąpiły w przypadku par z powłoką TiB_2 (około $111^\circ C$) i z warstwą borowaną w proszku $104^\circ C$. Zmiana nacisku powierzchniowego wpływa proporcjonalnie na wzrost temperatury w obszarze styku pary ślizgowej. Przy czym w przypadku par z warstwami azotowanymi i borowanymi w proszku w zakresie niskiego obciążenia (5–10 MPa) intensywność przyrostu temperatury jest niższa niż przy wyższym obciążeniu (10–20 MPa). Natomiast w przypadku pozostałych badanych par tendencja zmian przyjmuje odwrotny przebieg; wyższe naciski jednostkowe zmniejszają wzrost temperatury w obszarze tarcia.

Zarejestrowane przebiegi zmian współczynnika tarcia, siły tarcia i temperatury wskazują na zdolność adaptacji wężła ciernego do warunków tarcia wraz z wydłużaniem się czasu pracy wężła ciernego. W początkowym okresie pracy pary cierniej zawsze występuje intensywny wzrost współczynnika tarcia, a następnie zarejestrowane jego wartości wskazują na stabilizację warunków tarcia lub intensyfikację procesu tarcia. Stabilizacja oporów tarcia w badanych skojarzeniach wskazuje na dopasowanie się kompozycji skojarzenia do istniejących wymuszeń i ukształtowanie trwałych warstw przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych. Warstwy te zapewniają rozdzielenie współpracujących obszarów warstw powierzchniowych i ograniczanie intensywności występowania bezpośrednich kontaktów nierówności powierzchni [L. 11]. W tych warunkach tarcia występuje stan równowagi między procesami niszczenia i powstawania warstw w procesach tribochemicznych przebiegających w węźle tarcia. Zarejestrowane wartości współczynnika tarcia i temperatury w obszarze tarcia mogą posłużyć do oszacowania prawdopodobieństwa uszkodzenia wężła ciernego w wyniku jego zatarcia pod wpły-

wem wystąpienia wymuszeń zewnętrznych lub awaryjnego zużycia elementów pary [L. 12].

W tych warunkach obciążenia przeprowadzono także pomiar zużycia stopu łożyskowego, który wykazał najniższe wartości w parach z warstwami powierzchniowymi azotowanymi, borowanymi w proszku i ulepszanymi cieplnie. Zużycie stopu łożyskowego nie przekracza 0,01 mg, a rozrzut wartości zużycia nie jest większy od 20% (Rys. 5). W parach z powłoką TiB_2 i z warstwą borowaną laserowo zużycie stopu łożyskowego jest prawie dwukrotnie wyższe i wynosi 0,015 mg w parach z warstwą borowaną laserowo i 0,018 mg w parach z powłoką TiB_2 . Występujące różnice w zużyciu stopu łożyskowego i brak mierzalnych zmian zużycia

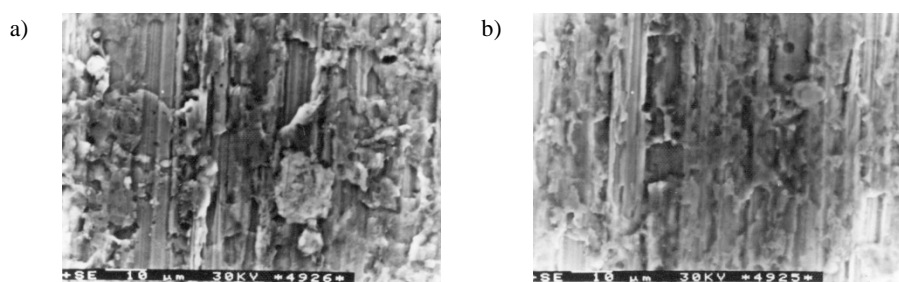


Rys. 5. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na zużycie masowe stopu łożyskowego AlSn20: A – azotowanie, B – borowanie w proszku, C – ulepszanie cieplne, D – TiB_2 , E – borowanie laserowe

Fig. 5. Influence of surface treatment annular sample on wear of AlSn20 bearing alloy: A – nitrogen hardening, B – powder pack boriding, C – quenched and tempered, D – TiB_2 , E – laser boronizing

próbek pierścieniowych z technologicznymi warstwami powierzchniowymi są efektem oddziaływania na siebie współpracujących warstw powierzchniowych, jak również występowania zjawisk fizykochemicznych na ich powierzchniach w wyniku wymuszeń zewnętrznych. Istotne znaczenie odgrywa tutaj oddziaływanie czynnika smarnego, który ulegając przemianom tworzy korzystne lub niekorzystne warunki tarcia. Zmiany te

powodują powstawanie warstw granicznych na wytworzonych warstwach powierzchniowych, charakteryzujących się dużą odpornością na zniszczenie lub też ulegających szybkiemu zniszczeniu pod wpływem zmiennych warunków pracy. W warunkach współpracy występują również wtórne zjawiska procesu tarcia i zużycia. Do tych zjawisk zalicza się oddziaływanie oddzielonych cząstek zużycia na trące warstwy powierzchniowe, przenoszenie cząstek materiału z jednego elementu na drugi, emisja elektronów i przepływ prądu korozyjnego [L. 13]. Efekty przenoszenia materiału zaobserwowano głównie na próbkach pierścieniowych borowanych w proszku i z powłoką TiB_2 (Rys. 6).

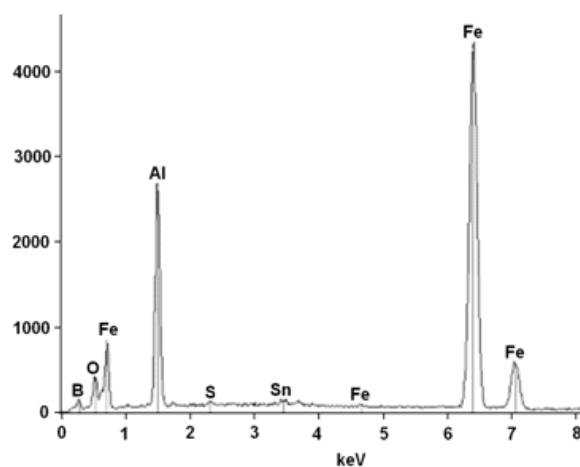


Rys. 6. Obrazy warstwy powierzchniowej: a) borowanej w proszku i b) z powłoką TiB_2

Fig. 6. Images of (a) powder pack boriding surface layer and (b) TiB_2 coating

W warunkach tarcia ślizgowego pomimo obecności czynnika smarowego zachodzą procesy utleniania, co powoduje powstawanie tlenków (Rys. 7). Powstałe tlenki w procesach tarcia prowadzą do obniżenia współczynnika tarcia i zużycia, ale w niekorzystnych warunkach tarcia w skojarzeniach z twardymi i kruchymi warstwami powierzchniowymi powodują zwiększone zużycie w wyniku oddziaływania produktów zużycia [L. 14]. Wysokie zużycie stopów łożyskowych w parach z próbkami pierścieniowymi z powłokami TiB_2 tłumaczy się efektem zwiększonej początkowej chropowatości warstwy wierzchniej i wpływem obciążenia. W początkowym etapie współpracy prowadzi to do intensywnego usuwania materiału przeciwpróbki o mniejszej twardości. Zmiany te powodują wygładzanie powierzchni, usunięcie nieregularności powierzchni i stabilizację procesu zużycia. Jednak obciążenie powłoki TiB_2 prowadzi do jej zmęczenia i powstawania pęknięć i innych defektów, ułatwia to

chemiczne oddziaływanie aluminium i jego dyfundowanie w głąb warstwy [L. 15]. Wzmaga to procesy zużycia stopu łożyskowego, zwłaszcza że wytworzona warstwa TiB_2 charakteryzuje się nieregularnym i nieukierunkowanym rozkładem wysokości chropowatości. Badania chropowarstw wykazują, że zużycie warstwy powierzchniowej w procesie tarcia zależy nie tylko od wysokości chropowatości, lecz także od kształtu i kierunku śladów obróbki. Przy większej chropowatości powierzchni mniejsze zużycie powierzchni obserwuje się, gdy współpracujące warstwy wierzchnie mają ślady obróbki równoległe do kierunku ruchu ślizgania [L. 16].



Rys. 7. Analiza składu pierwiastków w warstwie wierzchniej próbki borowanej w proszku po współpracy z próbką AlSn20

Fig. 7. Spectrum of the annular samples with powder pack boriding surface layer after test in cooperation with AlSn20 bearing alloy

WNIOSKI

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

1. Warstwy powierzchniowe borowane w proszku wpływają na obniżenie współczynnika tarcia podczas rozruchu, a jego maksymalne wartości są zbliżone do zmierzonych w skojarzeniach z warstwami azotanymi i ulepszanymi cieplnie.

2. Zastosowanie w skojarzeniu ślizgowym próbek ze stali 30MnB4 po ulepszeniu cieplnym zapewnia zbliżone wartości współczynnika tarcia, temperatury i porównywalny poziom zużycia materiału stopu łożyskowego, jak w przypadku stali 38CrAlMo5-10 z warstwą powierzchniową azotowaną.
3. Największe wartości współczynnika tarcia i najwyższe temperatury w obszarze tarcia występują w parach z próbkami pierścieniowymi z warstwą borowaną laserowo i z powłoką TiB₂.
4. Najwyższe zużycie stopu łożyskowego występuje w parze ślizgowej z powłoką TiB₂ i z warstwą borowaną laserowo, natomiast najmniejsze w skojarzeniach z warstwami azotowanymi i ulepszanymi cieplnie.
5. Warstwy powierzchniowe wytworzone na próbkach pierścieniowych, w wyniku zastosowania technologii azotowania, borowania w proszkach, borowania laserowego, ulepszania cieplnego stali 30MnB4 i procesu PVD (powłoka TiB₂) nie wykazały mierzalnego zużycia triologicznego w warunkach tarcia ślizgowego.

LITERATURA

1. Bejar M.A., Moreno E.: Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steel. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, 2006, s. 352–358.
2. Martini C., Palombarini G., Poli G., Prandstraller D.: Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings. *Wear*, vol. 256, 2004, s. 608–613.
3. Przybyłowicz K.: Teoria i praktyka borowania stali. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2000.
4. Atik E., Yunker U., Meric C.: The effect of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels. *Tribology International*, 36 (2003) 155–161.
5. Meric C., Sahina S., Yilmaz S.S.: Investigation of the effect on boride layer of powder particle size used in boronizing with solid boron-yielding substances. *Materials Research Bulletin*, vol. 35, 2000, s. 2165–2172.
6. Sen U., Sen S., Yilmaz F.: Structural characterizations of boride layer on boronized ductile irons. *Surface Coating technology*, 176 (2000) 223–228.
7. Panish N., Wangyao P., Hannongbua S., Sricharoenchai P., Sun Y.: Tribological study of nano-multilayer ultra-hard coatings based on TiB₂. *Rev. Adv. Mater Sci*, vol. 13, 2006, s. 117–124.

8. Basu B., Vleugels J., Van Der Biest O.: Fretting wear behavior of TiB₂-based materials against bearing steel under water and oil lubrication. *Wear*, vol. 250, 2001, s. 631–641.
9. Kulka M., Pertek A.: The importance of carbon content beneath iron borides after boriding of chromium and nickel-based low carbon steel. *Applied Surface Science*, vol. 214, 2003, s. 161–171.
10. Sen U., Sen S., Yilmaz F.: The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steel. *Material Characterization*, vol. 50, 2003, 261–267.
11. Ozimina D.: *Przeciwzużyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych*. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002.
12. Szczerek M., Wiśniewski M.: *Tribologia i tribotechnika*. ITeE, Radom 2000.
13. Schouwenaars R., Jacobo V.H., Ortiz A.: Microstructure aspect of wear in soft tribological alloys. *Wear*, vol. 263, 2007, s. 727–735.
14. Pranay A., Liang H., Usta M., Ucisik A.H.: Wear and surface characterization of boronized pure iron. *Journal of Tribology*, vol. 129, 2007, s. 1–10.
15. Berger M., Hogmark S.: Evaluation of TiB₂ coatings in sliding contact against aluminium. *Surface and Coating Technology*, vol. 149, 2002, s. 14–20.
16. Guha D., Chowdhuri R.: The effect of surface roughness on the temperature at the contact between sliding bodies. *Wear*, vol. 197, 1996, s. 63–73.

Recenzent:
Wojciech PRZETAKIEWICZ

Summary

The properties of the frictional slide couplings depend on the constructional material used and technology applied during the production process. The tribological properties of the frictional coupling are the resultant of the coupling construction and properties of the cooperating surfaces. The surface layer may be shaped by technological processes through the correct material selection used for these elements and technology applied for the surface treatment. Currently, numerous methods are used in producing the surface layers, which protect against tribological wear; however, particularly advantageous properties feature those coatings with boron. These coatings feature a high degree of the hardness of the structures, resistance to

wear and corrosion, and good fatigue properties, depending on the technological preparation of the base. The purpose of the study to determine the influence of the boron modification of the technological surface layer on the characterisation of the operation of frictional pairs under the conditions of mixed friction, and in practical application, increasing of the durability and reliability of frictional pairs and, in consequence, whole technical objects, such as automobiles.

In order to create surface layers modified with boron, technological processes were selected that allowed for the creation of these layers on the elements of a combustion engine. These processes were used for the treatment of the surface layer of annular samples for stand test on the T-05 block-on-ring wear tester. Three types of steel were used in the creation of annular samples, 38CrAlMo5-10, 46Cr2, and 30MnB4. Samples from 38CrAlMo5-10 steel were nitrided in the atmosphere H₂ + N₂, at the temperature of 500°C for 6 hours. Samples from 46Cr2 steel were borided in powder, at the temperature of 950°C for 8 hours. In the boronizing process, powder of the following composition was used: B₄C-30%, Al₂O₃ -68%, NH₄Cl and NaF. Samples from 46Cr2 steel were also laser-borided, with the use of CO₂ laser (power of beam P = 2 kW, spot diameter d = 4 mm, energy density 160 W/mm², tracking speed v = 16 mm/s, gas carrier –argon). The boronizing process consisted in covering the annular sample with the layer of amorphous boron and liquid glass and melting with a laser beam. Also, the samples from steel 46Cr2 were covered with a TiB₂ coating, using the PVD method (temperature 400°C, time 40 min, pressure in ionization chamber p = 2,5 x 10⁻² bara). The sample of 30MnB4 steel was hardened and tempered, and hardening was at the temperature of 800°C, and drawing temper was at the temperature of 450°C. Modified surface layers of annular samples were matched under test conditions with counter samples made from AlSn20 bearing alloys. Tested slide pairs were lubricated during the stand test with 15W/40 Lotos mineral engine oil.

On the basis of the tests and the analysis of the results, it was concluded that the boron-modified surface layers can be applicable in the slide couplings operating under mixed friction conditions, and their tribological properties are the effect of the interaction between the surface layers of the slide coupling elements and the lubricating oil. The modified surface layer in the process of boronizing in pow-

der coupled with the AlSn20 bearing alloy is characterised by low friction resistance and temperature, which ensures that the slide coupling has conducive conditions for start-up and fast stabilisation of the friction conditions. In turn, the laser borided surface layer and layer TiB_2 causes intensive friction processes in the slide coupling, which generates high friction resistance and temperature and intensifies the processes of bearing alloy wear. It was stated that the use of 30MnB4 steel in the slide coupling after the hardening and tempering ensures similar work parameters and a comparable level of wear of the bearing alloy, as in the application of 38CrAlMo5-10 steel with a nitrided surface. The research proved that the lubrication of the friction area with the mineral oil has an influence on the decrease of wear of the bearing alloy and the decrease of the matching parameters of the moment of friction and temperature, mainly in the couplings with the AlSn20 alloy counter samples.

Using the boron-modification processes of surface layers in slide couplings operating under the conditions of mixed friction, it is possible to decrease the costs of material using mild-alloy steel or carbon steel and to decrease the costs of exploitation by increasing the durability of elements. However, each time surface layers with boron are used on a large scale, it should be preceded by economic calculation.