

## **Właściwości tribologiczne węzłów ślizgowych zawierających elementy z warstwami powierzchniowymi modyfikowanymi borem**

**JANUSZ LUBAS**

Uniwersytet Rzeszowski

Właściwości tribologiczne węzłów ciernych zależą od ich konstrukcji, zastosowanych materiałów i przeprowadzonej obróbki powierzchniowej ich elementów. Celem badań było wyznaczenie wpływu modyfikacji borem warstwy powierzchniowej elementów, zastosowanych w parach kinematycznych pracujących warunkach tarcia ślizgowego. Badania porównawcze przeprowadzono za pomocą testera T-05 typu rolka-klocek. Dla 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 pokryto powłoką  $TiB_2$ . Próbki pierścieniowe skojarzone zostały w warunkach testu z przeciwpórkami wykonanymi ze stopu łożyskowego AlSn20, a obszar tarcia smarowano olejem silnikowym Lotos syntetyczny 5W/40. Przeprowadzone badania wykazały, że warstwy powierzchniowe ulepszone ciepłnie wpływają na obniżenie momentu tarcia podczas rozruchu, a jego maksymalne wartości są niższe od zmierzonych w skojarzeniach z warstwami azotowanymi. Najwyższe wartości współczynnika tarcia i temperatury w obszarze tarcia stwierdzono w parach z próbkami pierścieniowymi z warstwą borowaną laserowo. Natomiast największe zużycie stopu łożyskowego AlSn20 występuje w skojarzeniu z próbką z powłoką  $TiB_2$ , a najniższe uzyskano w skojarzeniach z warstwami azotowanymi.

### **1. Wstęp**

Warstwa wierzchnia elementów konstrukcyjnych węzłów ciernych jest narażona na wysokie obciążenia dynamiczne i statyczne, oddziaływanie czynników korozyjnych, cieplnych oraz na zmęczenie i zużycie. Ponad 90% uszkodzeń elementów pojazdów samochodowych inicjowanych jest w warstwie wierzchniej elementów węzłów kinematycznych. Modyfikacja warstwy wierzchniej tych elementów wpływa na zwiększenie trwałości układu w wyniku wytworzenia twardej i odpornej warstwy na miękkim i ciągliwym rdzeniu. Do najczęściej wykorzystywanych metod modyfikacji warstwy wierzchniej zalicza się metody cieplne i cieplno-chemiczne. W procesach dyfuzji wprowadza się do obrabianego materiału np. bor, co pozwala na uzyskanie warstwy powierzchniowej o dużej twardości (powyżej 2000HV), odpornej na korozję i zużycie ściernie [1, 2]. Procesy borowania prowadzi się w temperaturach od 850 do 1000°C w ciągu 2-10 h, a wytworzona warstwa składa się z jednej fazy FeB lub  $FeB_2$  albo z dwufazowej struktury ( $FeB$  i  $FeB_2$ ) [3]. Właściwości tribologiczne uzyskanej

warstwy zależą od procentowego udziału borów FeB i FeB<sub>2</sub>, zastosowanych materiałów boronośnych, temperatury borowania, czasu obróbki i gatunku borowanego materiału [4]. W ostatnich dwóch dekadach szeroko stosuje się materiały ceramiczne o wyjątkowej kombinacji właściwości, jak: niska gęstość, wysoka odporność na korozję, mała rozszerzalność cieplna, wysoka twardość w szerokim zakresie temperatury i dużą odporność na zużycie. Do tej grupy materiałów należy TiB<sub>2</sub>, który charakteryzuje się: wysoką twardością, wysoką temperaturą topnienia, odpornością chemiczną i dobrą odpornością na zużycie ściernie [5, 6]. Pozwala to na zastosowanie tego materiału w wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych, narażonych na procesy zużywania 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 pękania [7]. Jednak cechy eksploatacyjne tych warstw zależą od: składu chemicznego, struktury warstwy powierzchniowej, metody wytwarzania, parametrów procesu technologicznego i ewentualnej obróbki cieplnej. W procesie wytwarzania warstw powierzchniowych modyfikowanych borem należy również uwzględnić wpływ czynników występujących podczas eksploatacji węzła ślizgowego [2, 8]. Dlatego istotne jest określenie wpływu modyfikacji warstwy powierzchniowej borem na warunki tarcia w węźle ślizgowym.

## 2. Opis badania

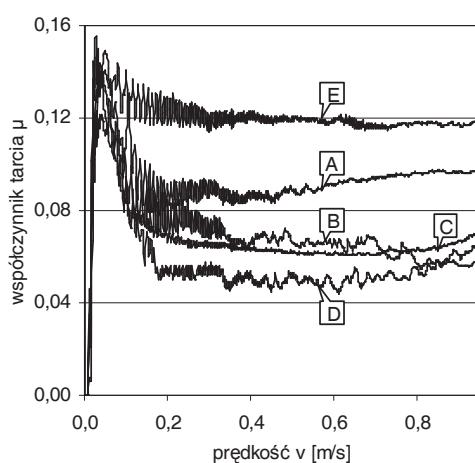
Celem badań było wyznaczenie wpływu technologicznie ukształtowanych warstw powierzchniowych modyfikowanych borem na parametry tarcia w węźle ślizgowym. Badania porównawcze przeprowadzono za pomocą testera T-05 typu rolka-klocek. Dla realizacji programu badań wykonano próbki pierścieniowe z trzech gatunków stali: 38CrAlMo5-10, 46Cr2 i 30MnB4. Próbki ze stali 38CrAlMo5-10 azotowano jonowo w atmosferze H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub>, w temperaturze 500°C i w ciągu 6h. Do obróbki próbek ze stali 46Cr2 zastosowano borowanie w proszku, borowanie laserowe i metodę PVD. Proces borowania w proszku (B<sub>4</sub>C-30%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-68%, NH<sub>4</sub>Cl i NaF) przeprowadzono w temperaturze 950°C, w ciągu 8h. Po procesie borowania próbki hartowano izotermicznie. Borowanie laserowe wykonano laserem CO<sub>2</sub>. 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<sup>2</sup>, prędkość obróbki v=16 mm/s, pokrycie ścieżek f=0,5 mm) w ochronnej atmosferze argonu. Metodę PVD zastosowano do nałożenia powłoki TiB<sub>2</sub> (temperatura 400°C, czas 40 minut, ciśnienie w komorze jonizacyjnej p=2,5x10<sup>-2</sup> bara). Próbki pierścieniowe ze stali 30MnB4 (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 syntetyczny 5W/40.

Badania przeprowadzono według określonego algorytmu obejmującego wstępne docieranie próbek oraz właściwy proces współpracy, przy założonej prędkości obro-

towej próbki pierścieniowej  $n=100$  obr/min i czasie trwania próby  $\tau_u=500$  s, oraz zmiennych naciskach jednostkowych (5, 10, 15 i 20 MPa).

### 3. Wyniki badań

Wpływ ukształtowanej warstwy powierzchniowej w procesach technologicznych na pracę węzła ślizgowego obserwowano od momentu rozpoczęcia pracy. Istotnym momentem pracy węzła ślizgowego jest rozruch i opory ruchu występujące w tym krytycznym czasie, gdy warunki smarowania są najmniej korzystne. Zachodzące w obszarze tarcia dynamiczne zmiany rejestrowano poprzez pomiar współczynnika tarcia w funkcji prędkości ślizgania. Zmierzone wartości, jak i występujące różnice w przebiegu krzywych wykazują dużą zmienność warunków tarcia w zależności od kompozycji skojarzenia ślizgowego i warunków obciążenia węzła ślizgowego (rys. 1).

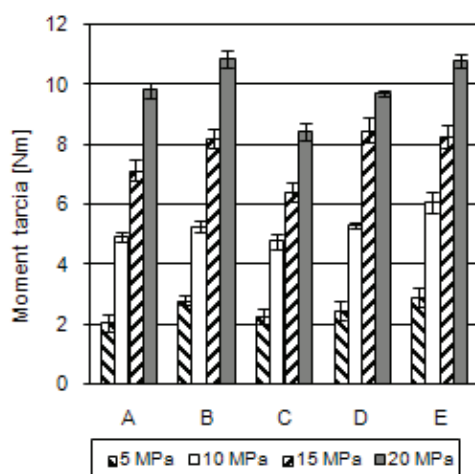


Rys. 1. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na zmianę współczynnika tarcia w funkcji prędkości ślizgania, przy obciążeniu 20 MPa; A - azotowanie, B - borowanie w proszku, C - ulepszanie cieplne, D - TiB<sub>2</sub>, E - borowanie laserowe.

Fig. 1. Influence of surface treatment of ring sample on change of friction coefficient vs. rotational speed at the load 20 MPa; A - nitrided, B - pack borided, C - quenched and tempered, D - coated TiB<sub>2</sub>, E - laser borided.

Podczas rozruchu pary ciernej występuje intensywny wzrost wartości współczynnika tarcia, a następnie – ze wzrostem prędkości – ślizgania znaczne jego obniżenie. Dalsze zmiany w przebiegu współczynnika tarcia w badanych skojarzeniach ślizgowych można podzielić na grupy. W pierwszej grupie znajdują się skojarzenia z warstwą powierzchniową azotowaną i powłoką TiB<sub>2</sub>, gdzie występuje ponowny wzrost współczynnika tarcia po przekroczeniu określonej prędkości ślizgania. Wzrost ten w skojarzeniu z warstwą powierzchniową azotowaną występuje po przekroczeniu prędkości ślizgania 0,2 m/s, a w skojarzeniu z powłoką TiB<sub>2</sub> po przekroczeniu

0,6 m/s. W skojarzeniach z warstwami powierzchniowymi borowanymi laserowo i ulepszanymi cieplnie obserwowano stabilizację poziomu wartości współczynnika tarcia pomimo wzrostu prędkości ślizgania. Natomiast w skojarzeniu z warstwą borowaną w proszku wystąpił istotny spadek wartości współczynnika tarcia po przekroczeniu 0,7 m/s. Najwyższe opory ruchu występują w skojarzeniu z warstwą borowaną laserowo, gdzie wartość współczynnika tarcia wynosi około 0,12, a następnie w kolejności malejącej w skojarzeniach z warstwą wierzchnią azotowaną oraz w skojarzeniach z warstwami ulepszanymi cieplnie, borowanymi w proszku i z powłoką  $TiB_2$  ( $\mu=0,05-0,07$ ).

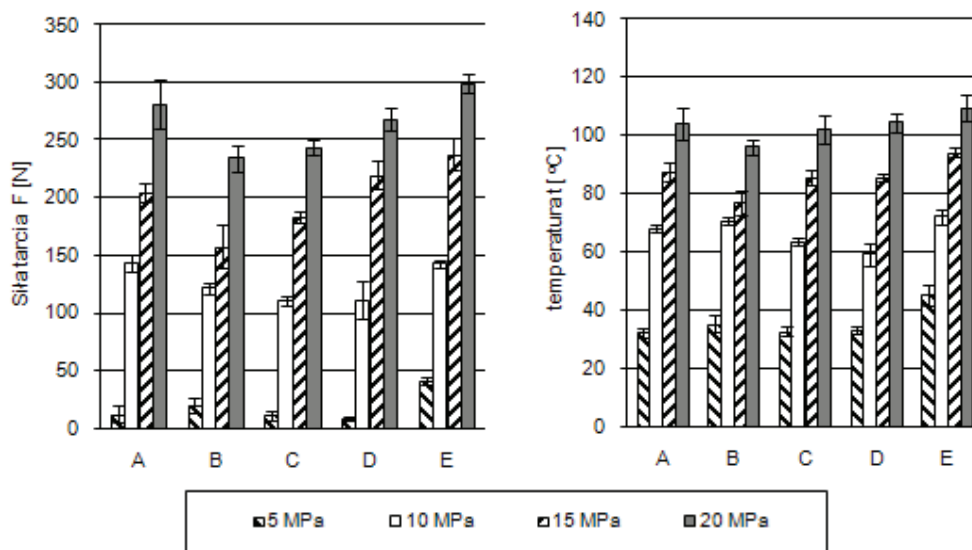


Rys. 2. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na moment rozruchu pary ślizgowej, A - azotowanie, B - borowanie w proszku, C - ulepszanie cieplne, D -  $TiB_2$ , E - borowanie laserowe.  
 Fig. 2. Influence of surface treatment of ring sample on moment of friction of sliding pair; A - nitrided, B - pack borided, C - quenched and tempered, D - coated  $TiB_2$ , E - laser borided.

W czasie rozruchu pary ślizgowej istotnym parametrem opisującym warunki tarcia jest wartość maksymalnego momentu rozruchowego (rys. 2). W badanych skojarzeniach najniższy moment tarcia podczas rozruchu zarejestrowano w parach z warstwą wierzchnią ulepszaną cieplnie i wynosi on około 8,3 Nm (przy 20 MPa). Istotny wzrost wartości momentu tarcia o około 20% występuje w parach z próbkami pierścieniowymi z warstwą wierzchnią azotowaną i z powłoką  $TiB_2$ . Najwyższe wartości momentu tarcia zmierzono w parach z warstwami borowanymi i przekraczają one ponad 10 Nm (przy 20 MPa). Podobne tendencje zmian oporów tarcia obserwuje się przy naciskach o wartości 5 MPa. Zastosowanie nacisków o wartości 15 MPa spowodowało, że zbliżony poziom wartości momentu tarcia (około 8 MPa) obserwowano w skojarzeniach z warstwami borowanymi i z powłoką  $TiB_2$ . Natomiast przy naciskach wynoszących 10 MPa wyższe wartości momentu tarcia o 20% rejestruje się tylko w parach z warstwami borowanymi laserowo w stosunku do pozostałych skojarzeń, gdzie poziom wartości momentu tarcia jest zbliżony i wynosi około 5 Nm.

Analiza zmian parametrów tarcia w okresie rozruchu informuje o prawdopodobnym zachowaniu się układu podczas 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. Natomiast wartość momentu rozruchowego decyduje o zapotrzebowaniu energetycznym układu kinematycznego w chwili jego uruchomienia. W parach ciernych, w których w tym czasie ukształtuje się stan równowagi tribochemicznej, powstają optymalne warunki do dalszej pracy układu. Zarejestrowane zmiany są wynikiem procesów fizykochemicznych i zmian mikrogeometrii powierzchni tarcia, w wyniku adaptacji systemu do warunków wymuszeń zewnętrznych [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 [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 ustalonych warunkach tarcia, przy stałej prędkości ślizgania ( $n=100$  obr/min), również obserwuje się istotne zmiany wartości siły tarcia i temperatury w obszarze tarcia (rys. 3). Rozrzut wartości zmierzonych sił tarcia przekracza 30%, a najniższe opory tarcia występują w skojarzeniach z warstwami borowanymi w proszku i ulepszanymi cieplnie (poniżej 250 N). W skojarzeniach z powłoką  $TiB_2$  wartości siły tarcia osiągają poziom 270 N, zaś w skojarzeniach z warstwą azotowaną około 280 N. Najwyższe opory tarcia wyznaczono w skojarzeniach z warstwą borowaną laserowo (300 N). Pomiary temperatury w obszarze tarcia wykazały najniższe wartości temperatury w skojarzeniu z warstwą borowaną w proszku (około  $96^\circ C$ ). Natomiast w przypadku skojarzeń z warstwami azotowanymi, ulepszanymi cieplnie i z powłoką  $TiB_2$  poziom zmierzonej temperatury jest zbliżony i wynosi około  $105^\circ C$ . Najwyższą temperaturę odnotowano w skojarzeniu z warstwą borowaną laserowo ( $110^\circ C$ ). Zmiana nacisku powierzchniowego wpływa proporcjonalnie na wzrost temperatury w obszarze styku pary ślizgowej. Przy czym w przypadku par z warstwami azotowanymi, ulepszanymi cieplnie, borowanymi w proszku i z powłoką  $TiB_2$  w zakresie niskiego obciążenia (5-10 MPa) intensywność przyrostu temperatury jest większa, niż przy wyższych obciążeniach (10- 20 MPa).

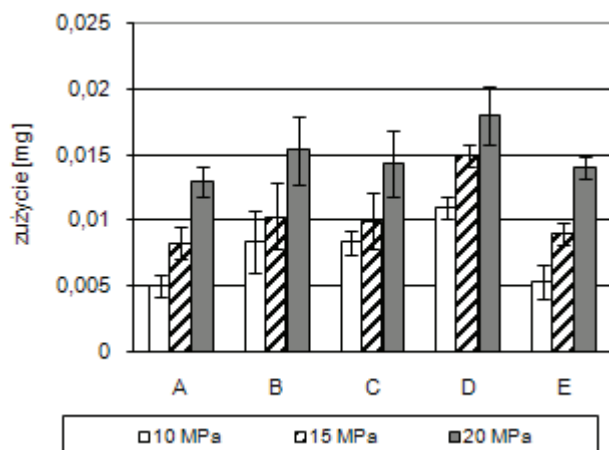


Rys. 3. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na siłę tarcia i temperaturę dla różnych wartości obciążenia pary ślizgowej przy 100 obr/min: A - azotowanie, B - borowanie w proszku, C - ulepszenie cieplne, D - TiB<sub>2</sub>, E - borowanie laserowe.

Fig. 3. Influence of surface treatment of ring sample on friction forces and temperature for various load values at rotational speed 100 rpm of ring sample; A - nitrided, B - pack borided, C - quenched and tempered, D - coated TiB<sub>2</sub>, E - laser borided.

Zarejestrowane przebiegi zmian siły tarcia i temperatury wskazują na zdolność adaptacji wężła ciernego do warunków tarcia wraz z wydłużaniem się czasu pracy wężła ciernego. Stabilizacja oporów tarcia w badanych skojarzeniach wskazuje na dopasowanie się kompozycji skojarzenia do istniejących wymuszeń i ukształtowanie trwałych warstw przeciwwyżyciowych i przeciwwzatarciowych. Warstwy te zapewniają rozdzielenie współpracujących obszarów warstw powierzchniowych i ograniczenie intensywności występowania bezpośrednich kontaktów nierówności powierzchni [9]. W tych warunkach tarcia występuje stan równowagi między procesami niszczenia i powstawania warstw w procesach tribochemicznych przebiegających w wężle tarcia. Zarejestrowane wartości siły tarcia i temperatury w obszarze tarcia mogą posłużyć do oszacowania prawdopodobieństwa uszkodzenia wężła ciernego, w wyniku jego zatarcia pod wpływem wystąpienia wymuszeń zewnętrznych lub awaryjnego zużycia elementów pary [10].





Rys. 4. Wpływ obróbki powierzchniowej próbki pierścieniowej na zużycie masowe stopu łożyskowego AlSn20: A - azotowanie, B - borowanie w proszku, C - ulepszenie cieplne, D - TiB<sub>2</sub>, E - borowanie laserowe.

Fig. 4. Influence of surface treatment of ring sample on wear of AlSn20 bearing alloy: A - nitrided, B - pack borided, C - quenched and tempered, D - coated TiB<sub>2</sub>, E - laser borided.

W tych warunkach obciążenia przeprowadzono także pomiar zużycia elementów, wykonanych ze stopu łożyskowego AlSn20, które wykazało najniższe wartości w skojarzeniach ślizgowych elementów z warstwami azotowanymi (rys. 4). Natomiast w skojarzeniach z warstwami borowanymi w proszku i laserowo oraz ulepszanymi cieplnie poziom zużycia stopu łożyskowego jest porównywalny (około 0,015 mg). W skojarzeniach z powłoką TiB<sub>2</sub> zużycie stopu łożyskowego jest o 20% wyższe i wynosi 0,018 mg. Przy niskich naciskach (10 MPa) stwierdzono podobne zużycie elementów ze stopu łożyskowego w skojarzeniach z elementami z warstwami wierzchnimi azotowanymi lub borowanymi laserowo.

Występujące różnice w zużyciu stopu łożyskowego i brak mierzalnych zmian zużycia próbek pierścieniowych z technologicznymi warstwami powierzchniowymi są efektem wzajemnego oddziaływania współpracujących warstw powierzchniowych i występowania zjawisk fizykochemicznych na ich powierzchniach w wyniku wymuszeń zewnętrznych i reakcji ze składnikami oleju silnikowego. Zmiany te powodują powstawanie warstw granicznych przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych, ale występują także zjawiska powodujące ich niszczenie pod wpływem zmiennych warunków pracy. W tych warunkach występują również wtórne zjawiska procesu tarcia i zużycia, jak: oddziaływanie oddzielonych cząstek zużycia na trące warstwy powierzchniowe, przenoszenie cząstek materiału z jednego elementu na drugi, emisja elektronów i przepływ prądu korozyjnego [11]. Wysokie zużycie stopów łożyskowych w parach z próbkami pierścieniowymi z powłokami TiB<sub>2</sub> 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. Wzmacnia to procesy zużycia stopu łożyskowego.

Zwłaszcza, że wytworzona warstwa  $TiB_2$ , charakteryzuje się nieregularnym i nieukierunkowanym rozkładem wysokości chropowatości. Badania chropowatych warstw 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 posiadają ślady obróbki równoległe do kierunku ruchu ślizgania [12].

#### 4. Wnioski

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

1. Warstwa wierzchnia ulepszana cieplnie na stali 30MnB4 wpływa na obniżenie momentu tarcia podczas rozruchu skojarzenia oraz siły i temperatury w obszarze tarcia w ustalonych warunkach tarcia, poniżej wartości zmierzonych w skojarzeniach z warstwami azotowanymi.
2. Zastosowanie w skojarzeniu ślizgowym warstw borowanych w proszku, borowanych laserowo oraz warstw ulepszanych cieplnie zapewnia porównywalny poziom zużycia materiału stopu żelazowego AlSn20.
3. Najwyższe wartości momentu tarcia, siły tarcia i temperatury w obszarze tarcia występują w skojarzeniach z próbkami pierścieniowymi borowanymi laserowo.

#### Literatura

- [1] BEJAR M. A., MORENO E.: *Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steel*. Journal of Materials Processing Technology 2006, vol. 173, p. 352-358.
- [2] MARTINI C., PALOMBARINI G., POLI G., PRANDSTRALLER D.: *Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings*. Wear 2004, vol. 256, 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, 2003, vol. 36, p. 155-161.
- [5] PANISH N., WANGYAO P., HANNONGBUA S., SRICHAROENCHAI P., SUN Y.: *Tribological study of nanomultilayer ultra-hard coatings based on  $TiB_2$* . Rev. Adv. Mater Sci 2006, vol. 13, p. 117-124.
- [6] BASU B., VLEUGELS J., VAN DER BIEST O.: *Fretting wear behavior of  $TiB_2$ -based materials against bearing steel under water and oil lubrication*. Wear 2001, vol. 250, p. 631-641.
- [7] 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 2003, vol. 214, s. 161-171.
- [8] SEN U., SEN S., YILMAZ F.: *The fracture toughness of borides formed on boronized cold work tool steel*. Material Characterization 2003, vol. 50, p. 261-267.
- [9] OZIMINA D.: *Przeciwzużyciowe warstwy wierzchnie w układach tribologicznych*. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2002.
- [10] SZCZEREK M., WIŚNIEWSKI M.: *Tribologia i tribotechnika*. ITE, Radom 2000.
- [11] SCHOUWENAARS R., JACOBO V. H., ORTIZ A.: *Microstructure aspect of wear in soft tribological alloys*. Wear 2007, vol. 263, p. 727-735.
- [12] GUHA D., CHOWDHURI R.: *The effect of surface roughness on the temperature at the contact between sliding bodies*. Wear 1996, vol. 197, p. 63-73.



## **Tribological properties of sliding pairs containing elements with surface layers modified with boron**

### **S u m m a r y**

On the basis of the tests and the analysis of the obtained results, it was concluded that the boron-modified surface layers can be applicable in the slide pairs operating under mixed friction conditions, and their tribological properties are the effect of interaction between the surface layers of the slide pair elements and the lubricating oil. The surface layers of ring sample modified in the process of boronizing in powder with the AlSn20 bearing alloy are characterized by low friction resistance and temperature, which ensures that the slide pair has conducive conditions for a start-up and fast stabilization of the friction conditions. In turn, the laser-borided surface layer and the TiB<sub>2</sub> layer causes intensive friction processes in the slide pair, which generates high friction resistance and high temperature and intensifies the processes of bearing alloy wear. It was stated that the use of 30MnB4 steel in the slide pairs after the hardening and tempering ensures similar work parameters and comparable level of wear of the bearing alloy, as in the application of 38CrAlMo5-10 steel with nitrided surface.