

Eugene FELDSHTEIN, Alicja LABER*, Oleg DEVOJNO,
Olga YATSKIEVICH**

BADANIA TRIBOLOGICZNE POWŁOK CERAMICZNYCH NATRYSKIWANYCH PLAZMOWO

THE TRIBOLOGICAL STUDIES OF PLASMA-SPRAYED CERAMIC COATINGS

Słowa kluczowe:

natryskiwanie plazmowe, powłoki ceramiczne, współczynnik tarcia, temperatura, zużycie

Key words:

plasma spraying, ceramic coatings, coefficient of friction, temperature, wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ powłok ceramicznych Al_2O_3 , Al_2O_3 -B i Al_2O_3 -Mo natryskiwanych plazmowo i rodzaju tarcia na właściwości

* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budowy i Eksploatacji Maszyn, 65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna, 50.

** Białoruski Narodowy Uniwersytet Techniczny, Wydział Budowy Maszyn, Republika Białoruś, 220027 Minsk, Pr. Nezavisimosti, 65, k. 6.

tribologiczne, tj. współczynniki tarcia, zużycie, temperaturę węzła tarcia. Jako grubość powłok przyjęto $0,5 \pm 0,7$ mm, materiałem, na który nakładano powłoki była stal C45.

WPROWADZENIE

Części współczesnych maszyn często wymagają ochrony powierzchni roboczych przed działaniem korozyjnym, zużyciem oraz doraźnymi uszkodzeniami mechanicznymi. Do tego wykorzystuje się powłoki nanoszone na powierzchnie robocze, w tym natryskiwane plazmowo. W zależności od wymagań eksploatacyjnych powierzchni natryskiwanie plazmowe pozwala kształtować powłoki o różnych właściwościach – odpornych na korozję i erozję, podwyższonych właściwościach tribologicznych, odporności na wysokie temperatury itp. [L. 1–3].

Spośród powłok natryskiwanych plazmowo znaczące miejsce zajmują powłoki na bazie proszków ceramicznych. W ostatnich latach do nanoszenia takich powłok coraz częściej wykorzystuje się wieloskładnikowe proszki ceramiczne, w które dyfuzyjnie wprowadza się dodatkowe pierwiastki. Cząstki takich proszków mają wymiary optymalne do przejścia przez strumień plazmy i nie potrzebują dodatkowego przygotowania technologicznego przed rozpoczęciem natryskiwania.

Szerokie rozpowszechnienie w przemyśle mają powłoki ceramiczne na bazie tlenku glinu Al_2O_3 . Materiał ten cechuje się wysoką twardością, odpornością na zużycie, odpornością korozyjną, nie oddziałuje z metalami podczas nagrzewania do wysokich temperatur. Celem niniejszej pracy było porównanie właściwości tribologicznych powłok natryskiwanych plazmowo na bazie proszku ceramicznego Al_2O_3 oraz proszków Al_2O_3 -B i Al_2O_3 -Mo zawierających wprowadzone dyfuzyjnie bor i molibden.

MATERIAŁY UŻYTE DO BADAŃ

Badania struktur powłok wykonano za pomocą mikroskopu skaningowego „Mira” produkcji firmy „Tescan” (Czechy). Łatwo zauważyć (**Rysunek 1**), że powłoki ceramiczne składają się z częściowo roztopionych, a następnie zakrzepniętych cząstek. Proces topienia zachodzi podczas lotu cząstek w strumieniu plazmy, co powoduje ich lepsze łączenie między sobą i z podłożem. Na zglądach powłok widać, że intensywność topienia materiału powłoki wzrasta w kierunku czysty tlenek glinu Al_2O_3

→ tlenek glinu z dodatkiem molibdenu $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ → tlenek glinu z dodatkiem boru $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$.

Na podstawie analizy rentgenostrukturalnej wykonanej za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego ogólnego przeznaczenia ДРОН-3,0 w monochromatycznym promieniowaniu kobaltowym ustalono skład fazowy powłok. Podczas natryskiwania plazmowego we wszystkich rodzajach powłok formują się modyfikacje tlenku glinu: wysokotemperaturowa $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ oraz niskotemperaturowa $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Zawartość modyfikacji wysokotemperaturowej $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ w powłokach z ceramiki z dodatkami boru i molibdenu jest nieco wyższa w porównaniu z powłoką na bazie czystego tlenku glinu. Zarejestrowano obecność w strukturze powłoki ceramicznej $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ borków żelaza, a w strukturze powłoki ceramicznej $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ tlenków molibdenu. W pobliżu podłoża wszystkie powłoki zawierają także fazę $\alpha\text{-Fe}$, co świadczy o dyfuzji żelaza ze stali do przylegających warstw powłoki ceramicznej.

WARUNKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Właściwości tribologiczne pary ciernej „klocek z powłoką plazmową – rolka ze stali C45 o twardości HRC 47-50 badano w warunkach styku skoncentrowanego za pomocą maszyny tarciovo-zużyciowej typu Amsler A-135 zgodnie z PN-H-04329:1979, PN-H-04332:1979. Prędkość obrotowa rolek była równa 200 obr./min (prędkość liniowa na powierzchni styku 0,46 m/s). Badania wykonano w warunkach tarcia technicznie suchego oraz tarcia mieszanego w obecności oleju przekładniowego mineralnego Shell Spirax A 80W-90. Ten środek smarowy zawiera siarczek olefiny w ilości 1÷2,99% (według informacji producenta). Prędkość przepływu środka smarowego – 30 kropli na minutę. Warunki tarcia: obciążenie wzrastające w zakresie 300÷450 N (wzrost o 50 N co 5 minut), a następnie obciążenie stałe węzła tarcia 500 N w czasie 1 h.

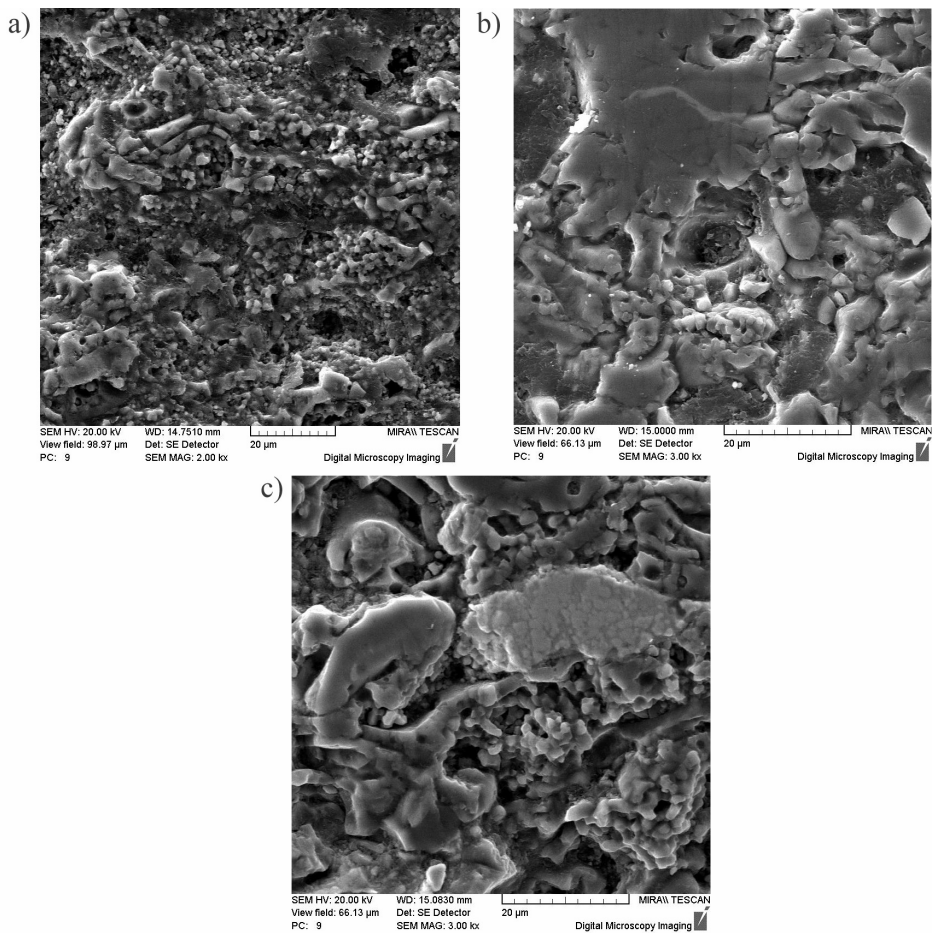
W czasie badań rejestrowano moment tarcia M_t i pracę tarcia A , na podstawie których obliczano chwilowy i średni współczynniki tarcia.

Szerokości śladów zużycia próbek mierzono po procesie tarcia z dokładnością 0,01 mm. Wielkości zużycia objętościowego Z_V oraz względnego zużycia objętościowego Z_{V_0} obliczano według wzorów:

$$Z_V = \frac{D^2 l}{8} \left\{ 2 \arcsin\left(\frac{b}{D}\right) - \sin\left[2 \arcsin\left(\frac{b}{D}\right) \right] \right\} [\text{mm}^3]; \quad Z_{V_0} = \frac{Z_V}{\tau} [\text{mm}^3/\text{min}],$$

gdzie: D – średnica rolki [mm], l – szerokość klocka [mm], b – średnia szerokość śladu tarcia [mm], τ – czas tarcia [min].

Stan powierzchni tarcia po zużyciu badano za pomocą mikroskopu Mikro 200 firmy „Planar” z kamerą cyfrową.



Rys. 1. Struktury powłok: a – Al_2O_3 ; b – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$; c – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$
Fig. 1. Structures of coatings: a – Al_2O_3 ; b – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$; c – $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

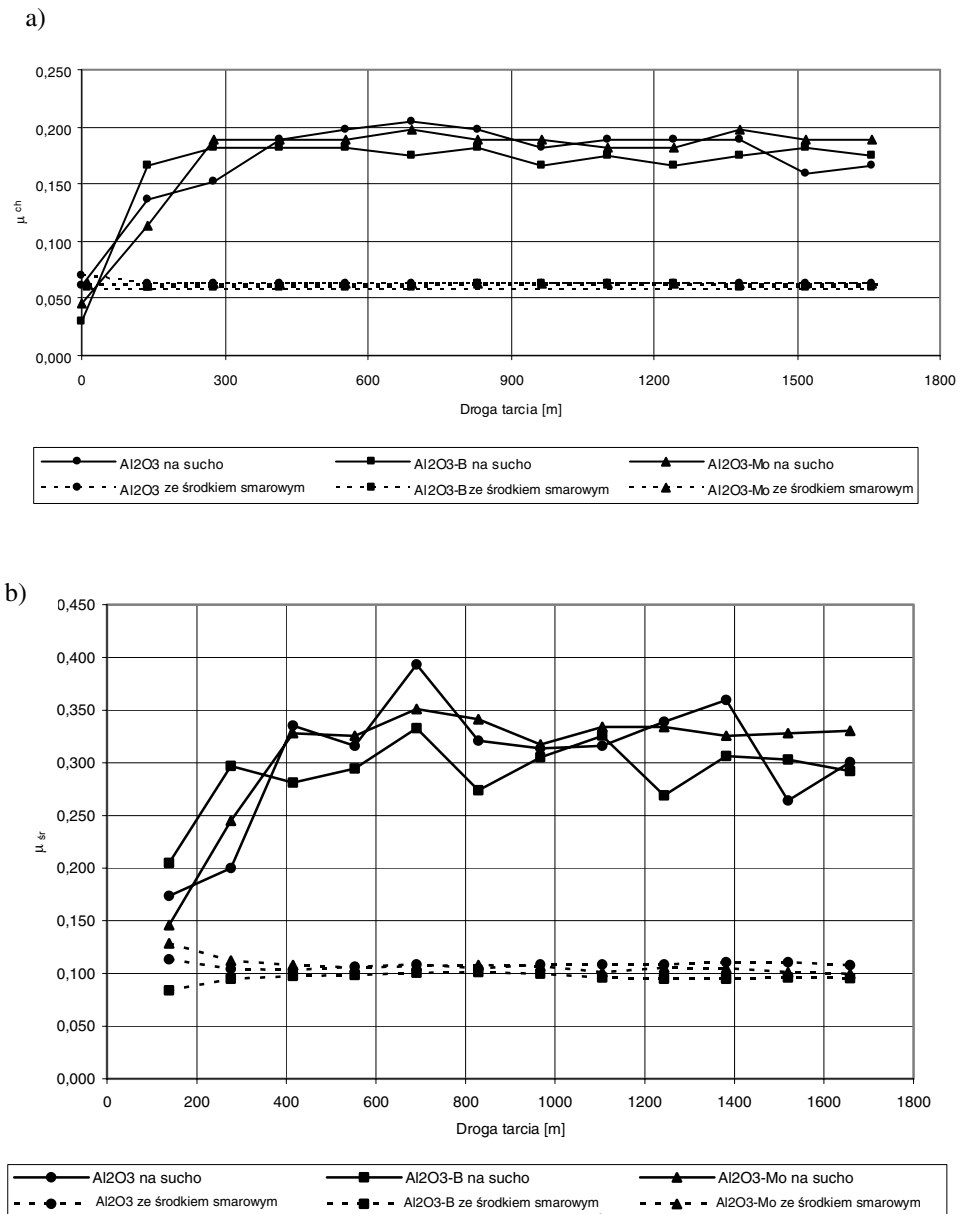
Z przeprowadzonych badań tribologicznych dla różnych skojarzeń (**Rysunek 2**) wynika, że przy stałym obciążeniu 500 N wartości chwilowych współczynników tarcia μ_{ch} dla różnych powłok ceramicznych są zbliżone. Różnica między wartościami średnich współczynników tarcia μ_{sr} dla różnych powłok sięga 30% i są one dwa razy większe w porównaniu z wartościami chwilowych współczynników tarcia μ_{ch} . Współczynniki tarcia przy różnych skojarzeniach par trących w obecności środka smarowego są około 3÷4 razy niższe w porównaniu z tarciami technicznie suchymi. Stabilność warunków tarcia potwierdza analiza statystyczna wyników badań: współczynnik zmienności chwilowego współczynnika tarcia $v_{ch} = s/\bar{x}$ w przypadku tarcia suchego powłoki Al_2O_3 nie przekracza 0,1, dla średniego współczynnika tarcia $v_{sr} = 0,075$. Dla powłok na bazie Al_2O_3 -B i Al_2O_3 -Mo współczynniki zmienności są ponad 2 razy mniejsze. Obecność oleju zapewnia prawie 100% stabilność współczynników tarcia.

W warunkach obciążenia wzrastającego skokowo o 50 N w zakresie 300 ÷ 450 N współczynniki tarcia rosną około 1,5 raza (**Rysunek 3**), aczkolwiek różnice między ich wartościami dla różnych powłok są podobne do opisanych wyżej.

Zmiany współczynników tarcia wpływają na zmiany temperatur w węźle tarcia (**Rysunek 4**). Temperatury w węźle tarcia przy obciążeniu wzrastającym są 1,5÷2 razy większe w porównaniu z tarciami przy obciążeniu stałym. Zastosowanie środka smarowego obniża temperaturę 2÷2,5 razy w porównaniu z tarciami technicznie suchymi.

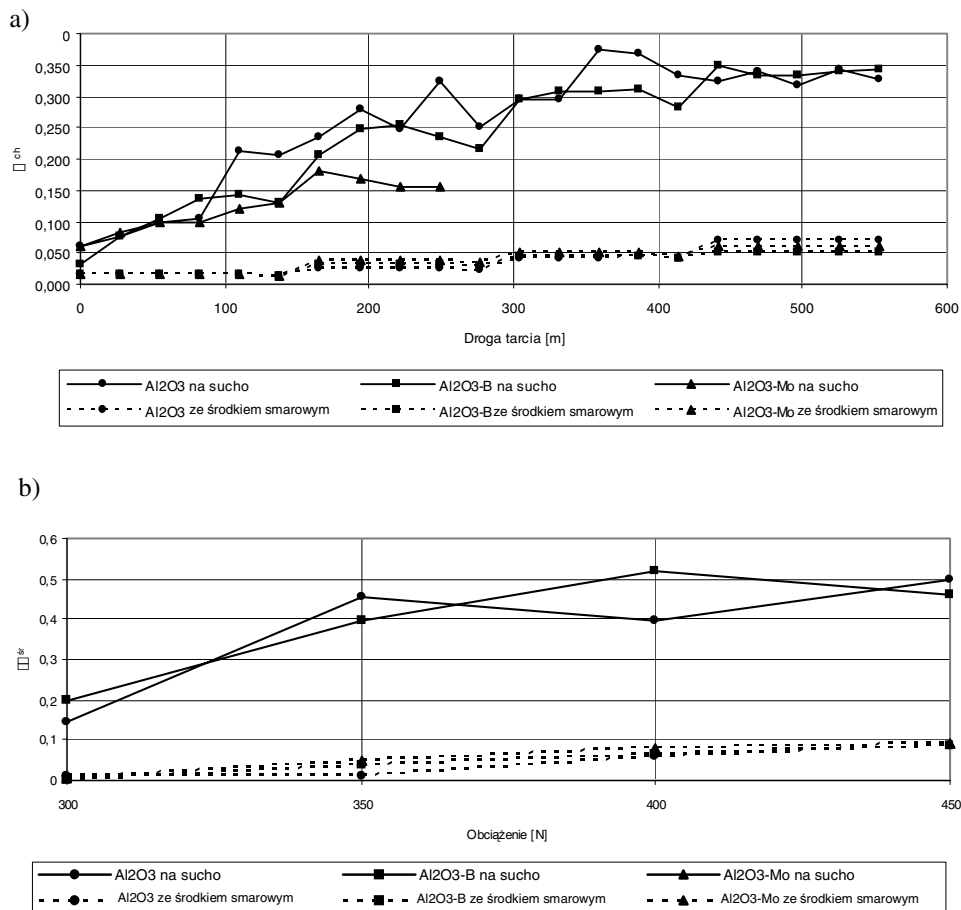
Z badań wynika, że powierzchnie powłok na bazie czystego Al_2O_3 zużywają się znacznie szybciej, niż powierzchnie powłok z ceramiki z dodatkami boru i molibdenu, przy czym intensywność zużycia ceramiki zawierającej bor jest znacznie mniejsza (**Rysunek 5**).

Przypuszczamy, że przyczynami takiego zachowania są: większy udział twardej wysokotemperaturowej fazy $\alpha-Al_2O_3$ oraz obecność w strukturze powłoki ceramicznej borków żelaza. Twardość tego związku (13 GPa) jest prawie o 1/3 wyższa od twardości ceramiki Al_2O_3 (10,65 GPa) [L. 4], więc zużycie powierzchni trącej jest niższe. Przy obciążeniu wzrastającym powłoka z ceramiki z dodatkiem molibdenu już po kilka minutach tarcia zostaje całkowicie wykruszona. Prawdopodobnie łączenie tego rodzaju powłok z podłożem jest słabsze i nie wytrzymuje zmian w wartościach naprężeń mechanicznych i cieplnych występujących podczas tarcia.



Rys. 2. Współczynniki tarcia powłok ceramicznych przy obciążeniu stałym 500 N w czasie 1 h

Fig. 2. Friction coefficients of ceramic coatings at constant loading 500 N during 1 h

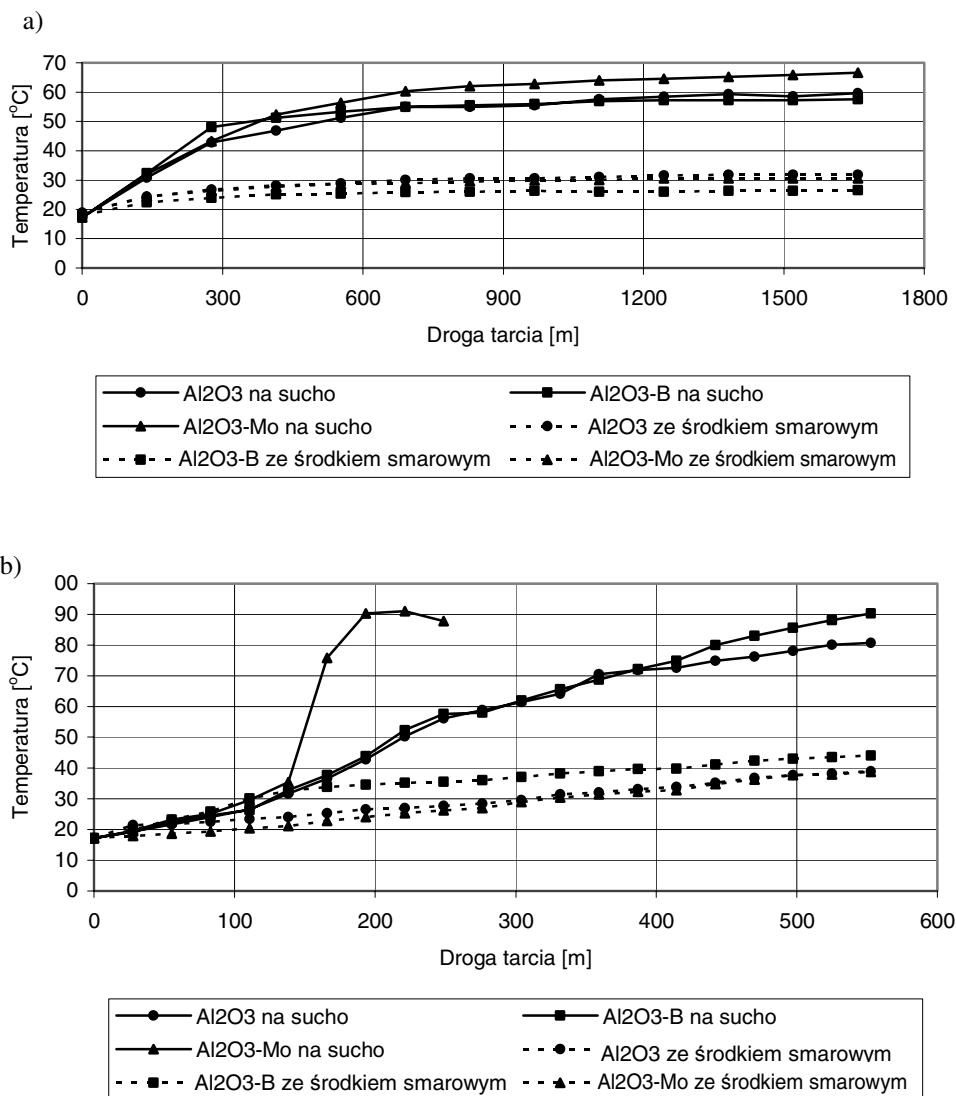


Rys. 3. Współczynniki tarcia powłok ceramicznych przy obciążeniu wzrastającym o wartość 50 N od 300÷450 N

Fig. 3. Friction coefficients of ceramic coatings when loading rising on value 50 N in the range 300÷450 N

Wyniki badań zużycia objętościowego przedstawiono na **Rysunku 5** (nie podano wartości zużycia powłoki ceramicznej Al₂O₃-Mo przy obciążeniu wzrastającym, ponieważ powłoka została wykruszona mechanicznie). W porównaniu ze zużyciem powłoki na bazie czystego Al₂O₃ wprowadzenie boru zmniejsza zużycie 1,7 razy w obecności środka smarowego i 7÷9 razy w warunkach tarcia suchego. Wprowadzenie molibdenu zmniejsza zużycie 1,7÷2 razy w obecności środka smarowego. Obec-

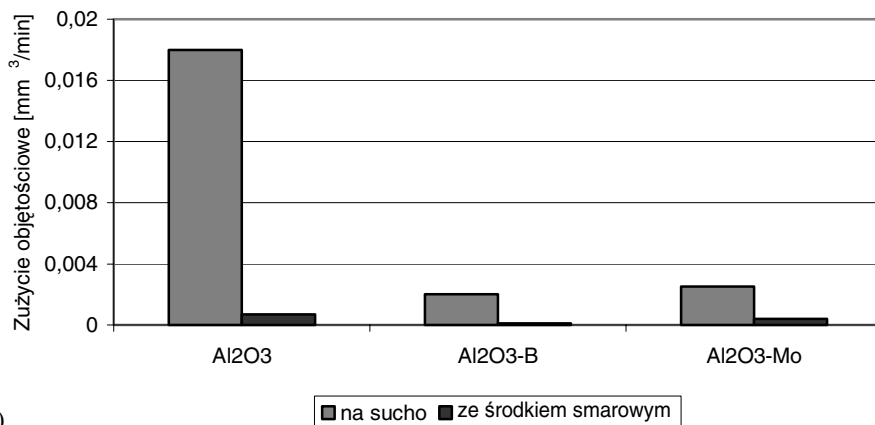
ność środka smarnego w niektórych przypadkach zmniejsza zużycie ponad 20 razy.



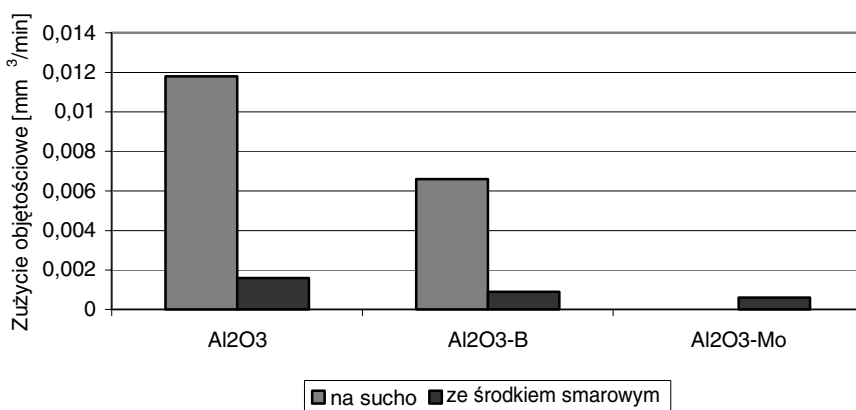
Rys. 4. Temperatury w strefie styku: a) przy obciążeniu stałym 500 N, b) wzrastającym o wartość 50 N od 300÷450 N

Fig. 4. Temperatures into contact zone: a) when constant loading 500 N, b) when loading rising on value 50 N in the range 300÷450 N

a)



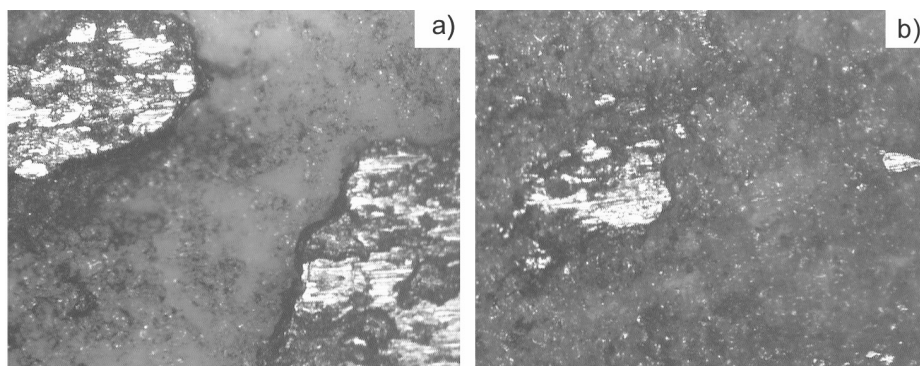
b)



Rys. 5. Wartości zużycia powłok po badaniach tribilobicznych: a) obciążenie stałe 500 N, b) obciążenie wzrastające o wartość 50 N w zakresie 300÷500 N

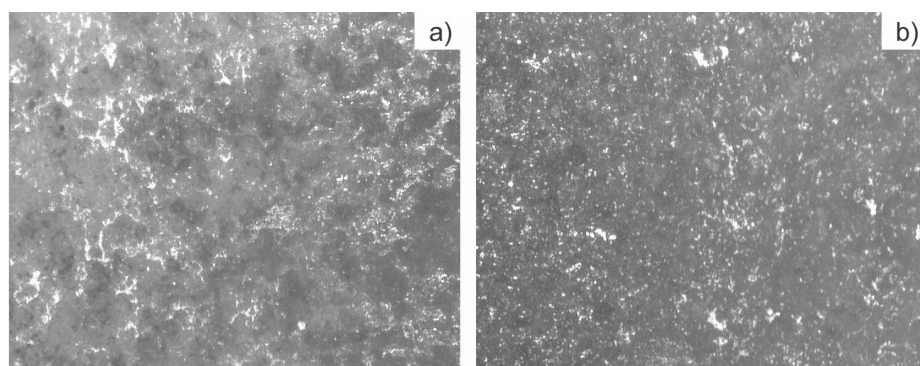
Fig. 5. Coatings wear values after tribilobical researches: a) constant loading 500 N, b) loading rising on value 50 N in the range 300÷450 N)

Stan powierzchni zużycia powłok na bazie czystej ceramiki Al₂O₃ oraz ceramiki z dodatkami zależy od warunków tarcia. W warunkach tarcia suchego na powierzchniach trących produkty zużycia tworzą namazywanie, które mocno łączy się z powłoką (**Rysunek 6**). Obecność środka smarowego zapewnia skuteczne odprowadzanie produktów zużycia ze strefy tarcia (**Rysunek 7**).



Rys. 6. Powierzchnie zużycia powłok w warunkach tarcia suchego: a – Al_2O_3 , b – Al_2O_3 z dodatkami ($\times 100$)

Fig. 6. Worn surfaces of coatings when dry friction ($\times 100$): a – Al_2O_3 , b – Al_2O_3 alloyed



Rys. 7. Powierzchnie zużycia powłok w warunkach tarcia mieszanego: a – Al_2O_3 , b – Al_2O_3 z dodatkami ($\times 100$)

Fig. 7. Worn surfaces of coatings when oil friction: a – Al_2O_3 , b – Al_2O_3 alloyed ($\times 100$)

WNIOSKI

Przeprowadzone badania właściwości tribologicznych natrykiwanych plazmowo powłok ceramicznych pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. W warunkach tarcia suchego, jak i mieszanego przy stałym obciążeniu wartości chwilowych współczynników tarcia dla badanych powłok ceramicznych są zbliżone do siebie, natomiast różnica między warto-

ściami średnich współczynników tarcia dla różnych powłok sięga 30%. W warunkach obciążenia wzrastającego współczynniki tarcia rosą około 1,5 raza. Obecność środka smarnego na powierzchniach trących powoduje zmniejszenie współczynników tarcia 3÷4 razy w porównaniu z tarciami technicznymi suchymi. Współczynnik zmienności chwilowego współczynnika tarcia w przypadku tarcia suchego powłoki Al_2O_3 nie przekracza 0,1, dla średniego współczynnika tarcia – 0,075. Dla powłok na bazie $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ i $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ współczynniki zmienności są ponad 2 razy mniejsze. Obecność oleju zapewnia prawie 100% stabilność współczynników tarcia.

2. Powierzchnie powłok na bazie czystego Al_2O_3 zużywają się znacznie szybciej niż powierzchnie powłok na bazie ceramiki z dodatkami boru i molibdenu, przy czym zużycie powłok z ceramiki zawierającej bor jest kilkakrotnie mniejsze. Zastosowanie środka smarnego zdecydowanie, tj. 20÷25 razy polepsza właściwości przeciwzużyciowe powłok ceramicznych w porównaniu z tarciami technicznymi suchymi.
3. W porównaniu z powłokami ceramicznymi na bazie tlenku glinu znacznie lepsze właściwości tribologiczne mają powłoki na bazie tlenku glinu z dodatkiem boru, mniej korzystnym jest wprowadzenie w skład powłoki dodatku molibdenu.

LITERATURA

1. Heimann R.B., Plasma Spray Coating, Principles and Applications. Ed. 2. Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
2. D’Agostino R., Favia P., Kawai Y., Ikegami H., Sato N., Arefi-Khonsari F. Advanced Plasma Technology. Wiley-VCH, Berlin 2007.
3. Chattopadhyay R. Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes. Kluwer Academic, Boston 2004.
4. <http://laser-fti.narod.ru/Alumin.htm>.

Recenzent:
Krzysztof DRUET

Summary

Plasma-sprayed coatings on the base of ceramic powders Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ and $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Mo}$ were investigated. The thickness of coatings after processing was equal to 0.5–0.7 mm, the base material was steel

C45. The analysis of metallographic samples of coatings allowed us to find that ceramic coatings consists of quasi-molten and then harden particles. The molten intensity of coating material $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}$ is more in comparison with other materials. Research using friction-wear machine of the Amsler type determined that values of the friction coefficient for coatings are practically equal when dry friction. The presence of gearbox oil decreases the friction coefficients of the researched coatings by about 3 to 4 times in comparison with dry friction conditions. During dry friction and friction with gearbox oil, the surface of Al_2O_3 coating abrades more quickly in comparison with coats alloyed. The relative solid wear of ceramic coating alloyed by boron is considerably smaller in comparison with other coatings. The presence of oil decreases relative solid wear of researched coatings more then 20 times in comparison with dry friction conditions according to the peculiarity of friction pair work. The presence of oil guarantees the removal of wear products successfully from the friction area.