

Eugene FELDSHTEIN*, **Margarita A. KARDAPOLOVA****

WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE POWŁOK NA BAZIE ŻELAZA OTRZYMANÝCH RÓŻNYMI METODAMI TECHNOLOGICZNYMI

THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF FERROUS BASED COATINGS FORMED USING DIFFERENT TECHNOLOGICAL METHODS

Słowa kluczowe:

natryskiwanie plazmowe, stopowanie laserowe, powłoki na bazie żelaza, współczynnik tarcia, zużycie

Key words:

plasma spraying, laser alloying, ferrous-based coatings, coefficient of friction, wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono wpływ powłok na bazie żelaza o różnym składzie chemicznym, nanoszonych różnymi metodami technologicznymi

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

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

oraz warunków tarcia na właściwości tribologiczne pary trącej, tj. współczynnik tarcia i intensywność zużycia elementów węzła tarcia. Materiałem, na który nakładano powłokę, była stal C45, grubość powłok znajdowała się w zakresie $0,5 \pm 0,7$ mm.

WPROWADZENIE

Zapewnienie wzrostu względnych prędkości współoddziaływania elementów maszyn i przenoszonych przez nie obciążeń jest podstawową tendencją rozwoju konstrukcji maszyn. W wyniku tego coraz większego znaczenia nabierają zagadnienia technologii produkcji i regeneracji części maszyn, które będą mogły spełniać wysokie wymagania w zakresie realizacji zadań eksploatacyjnych. Istnieją różne technologie regeneracji części maszyn, wśród których wyróżnia się powlekanie galwaniczne, nanoszenie powłok natryskiwaniem (gazowe, w łuku elektrycznym, plazmowe), powlekanie i stopowanie laserowe oraz inne. W procesie regeneracji zużytych powierzchni elementów maszyn wykorzystuje się różnorodne powłoki, w tym na bazie różnych metali i ich stopów, tlenków, węglików i innych związków chemicznych metali, związków organicznych itp. [L. 1–5].

Wieloskładnikowe powłoki na bazie żelaza cechują się z jednej strony dość wysokimi właściwościami tribologicznymi, przede wszystkim 2–3 razy większą odpornością na zużycie w porównaniu z utwardzoną stalą, z drugiej zaś dobrą obrabialnością w porównaniu z innymi powłokami metalowymi i ceramicznymi [L. 6, 7]. Celem niniejszej pracy była analiza właściwości tribologicznych skojarzeń „powłoka na bazie żelaza – stal”. Wykorzystano powłoki natryskiwane plazmowo tak w stanie wejściowym, jak i po dodatkowym stopowaniu laserowym borkami i węglkami.

CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW UŻYTYCH DO BADAŃ

Do wytwarzania powłok wykorzystano materiał proszkowy P-Cr4Mn2B4Si2V1 (PII-X4Г2P4C2Ф). Dla porównania efektywności powłok zastosowano bardzo szeroko stosowany materiał proszkowy P-Cr16Fe5B4Si4 (PII-XH80C4P4). Są to materiały z grupy stopów samotopnikujących się, które cechują się [L. 7, 8]:

- 1) zdolnością do tworzenia w procesie nanoszenia powłoki warstewek tlenków wskutek topnikowego wpływu boru i krzemu;
- 2) względnie niską temperaturą topienia (1200 ÷ 1300 K) wskutek utworzenia w stopie łatwotopliwych eutektyk;
- 3) dużą odpornością korozyjną i odpornością na zużycie.

Skład chemiczny badanych materiałów przedstawiono w **Tabeli 1**.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych materiałów

Table 1. Chemical composition of materials tested

Gatunek	Składniki podstawowe [%]							
	C	Cr	Si	Mn	Ni	V	B	Fe
P-Cr4Mn2B4Si2V1	1,0-1,2	3,5-4,5	2,0-2,5	2,0-2,5	-	0,5-0,9	3,3-4,3	Material bazowy
P-Cr16Fe5B4Si4	0,6-1,0	15-18	3,0-4,5	-	Material bazowy	-	2,9-3,8	≤5,0
Dopuszcza się domieszki 0,05-0,5% Al i 0,05-0,5% Cu w proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 oraz do 0,04% S i P w obydwóch materiałach.								

Jako materiał podłoża zastosowano stal C45. Warstwę powłoki nanoszono na powierzchnię próbki metodą natryskiwania plazmowego przy następujących parametrach technologicznych: natężenie łuku plazmowego 250 A, napięcie 80 V, gaz procesowy – azot pod ciśnieniem 0,6 MPa. Grubość powłok po natryskiwaniu i obróbce mechanicznej była równa 0,5±0,7 mm, co zapewniło realizację badań tribologicznych bez przetarcia powłoki. Przed natryskiwaniem w celu zwiększenia przyczepności na próbkę nanoszono warstwę boru amorficznego o grubości 0,1 mm. Grubość warstwy kontrolowano za pomocą głębokościomierza magnetycznego.

Po natryskiwaniu powierzchnie powłok poddano w jednym przypadku nadtapianiu ogniowemu za pomocą palnika acetylenowego, zaś w drugim przypadku – za pomocą lasera o działaniu ciągłym i mocy 1200 W. Parametry obróbki: prędkość przemieszczenia wiązki laserowej 200 mm/min, średnica wiązki 1 mm.

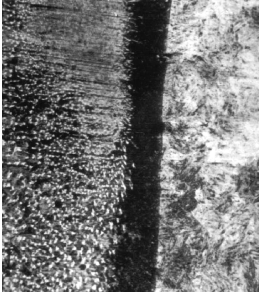
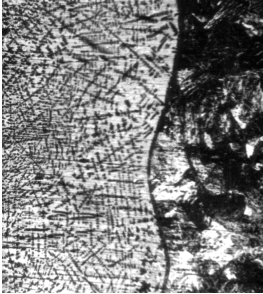
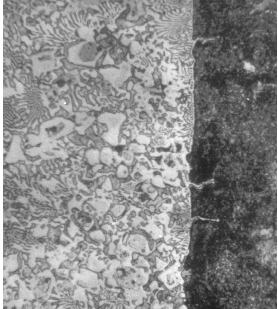
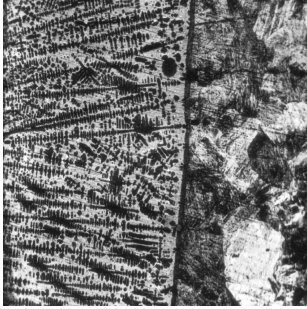
W innych przypadkach na powierzchnię powłoki dodatkowo nanoszono warstwę stopującą na bazie proszków B_4C , TaB lub MoB wymieszanych w spoiwie klejowym. Grubość warstwy sięgała $0,09 \pm 0,11$ mm. Naniesiona warstwa była nadtapiana w promieniowaniu laserowym w warunkach: średnica wiązki laserowej 3 mm, prędkość przesunięcia wiązki 100 m/min przy stopowaniu borkami metali i 200 m/min przy stopowaniu proszkiem B_4C . W celu otrzymania stałego składu fazowego i właściwości w całej warstwie powłoki przyjęto współczynnik nałożenia się wiązek równy 0,8.

Decydującymi czynnikami wpływającymi na kształtowanie struktury powłoki w trakcie obróbki laserowej są duże prędkości nagrzewania (10^4 – 10^6 K/s) warstwy obrabianej oraz jej chłodzenia. W wyniku dużych prędkości nagrzewania zachodzi dyfuzyjne przemieszczenie obszarów przemian fazowych – samorzutne rozprzestrzenianie się cząsteczek pokrycia w materiale podłoża, będące konsekwencją chaotycznych zderzeń cząsteczek powłoki między sobą lub z cząsteczkami podłoża. Duże prędkości chłodzenia powodują niepełną realizację tych procesów, tworzenie dużej ilości zarodków ziaren i w związku z tym powstawanie drobnoziarnistej nieźrównoważonej struktury [L. 9].

Struktury i skład fazowy powłok badano za pomocą mikroskopu optycznego „Unitem” przy powiększeniu $\times 400$, mikroskopu skaningowego MPЭM-200 oraz uniwersalnego dyfraktometru rentgenowskiego ДРОН-3.0.

Tabela 2 przedstawia zmiany mikrostruktur powłok w zależności od zastosowanych technologii ich naniesienia oraz wykorzystanych materiałów. Nadtapianie ogniowe cechuje się objętościowym rozgrzewaniem materiału, podczas którego powłoka pozostawała roztopiona dość długo, 5 do 10 s. W tym czasie zachodzą krystalizacja i całkowite krzepnięcie powłoki przy niewielkich prędkościach stygnięcia. Wskutek tego powstaje struktura roztworu twardego na bazie żelaza o ziarnach kulistych. Na granicach ziaren są widoczne skupiska fazy węglkoborkowej oraz eutektyk Fe– Fe_2B i Fe–FeB. Przy nadtapianiu laserowym powłok bez dodatkowych warstw oraz po nanoszeniu warstw TaB i MoB powstaje metastabilna struktura wzmocniona dendrytami I, II i III rodzaju, składającymi się z stopowanego α -żelaza i γ -żelaza. Między osiami dendrytów tworzy się drobnoziarnista eutektyka borkowa.

Tabela 2. Mikrostruktury powłok w zależności od warunków ich naniesienia
 Table 2. Microstructures of coatings as an effect of processes condition

Mikrostruktura		
Dodatkowy materiał stopowy	TaB, MoB	B ₄ C
Zastosowana technologia kształtowania powłoki	Nadtapianie laserowe	Nadtapianie laserowe
Mikrostruktura		
Dodatkowy materiał stopowy	Brak	Brak
Zastosowana technologia kształtowania powłoki	Nadtapianie ogniowe	Nadtapianie laserowe

Przy nadtapianiu laserowym powłoki dodatkowo stopowanej węglikiem boru B_4C zaobserwowano duże ilości wtrąceń typu $(Cr, Fe)_{23}(C, B)_6$ na tle drobnoziarnistej eutektyki na bazie przesyconego roztworu stałego węgla, krzemu i chromu w żelazie.

Twardość badanych powłok znajdowała się w przedziale 55÷60 HRC.

WARUNKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Właściwości tribologiczne pary trącej badano w warunkach styku skoncentrowanego za pomocą maszyny tarciovo-zużyciowej A-135 typu Amsler zgodnie z PN-H-04332:192 (metoda A – rolka się obraca, klocek jest nieruchomy). Prędkość obrotowa rolki wynosiła 200 obr./min (prędkość liniowa na powierzchni styku 0,37 m/s). Badania wykonano w warunkach tarcia technicznie suchego oraz tarcia mieszanego w obecności oleju bazowego SN-150. Dozowanie środka smarowego – 30 kropli na minutę. W trakcie badań stosowano stałe obciążenie 1000 N, czas pracy skojarzenia – 15 min. Badania powtarzano 3-krotnie.

Przeciwpółki (klocki) wykonano ze stali C45 w stanie hartowanym, ich twardość znajdowała się w przedziale 43÷45 HRC.

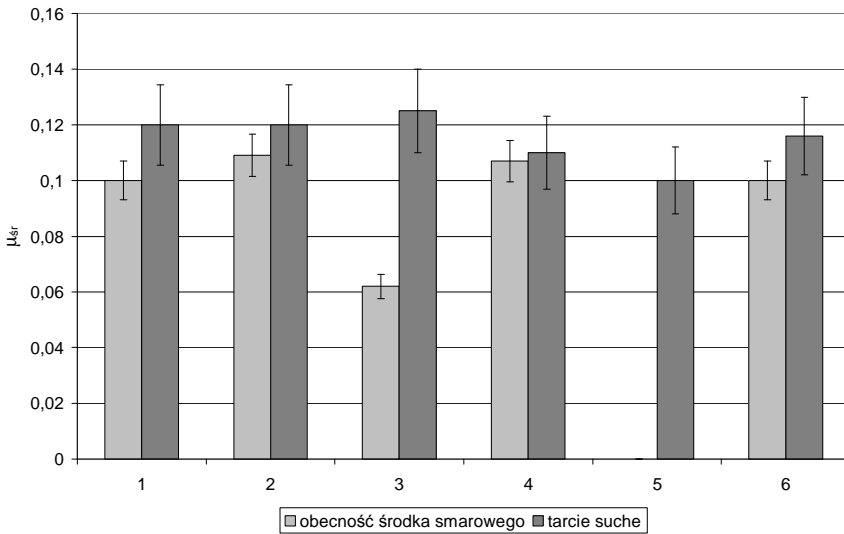
W czasie badań rejestrowano moment tarcia M_t i pracę tarcia A , na podstawie których obliczano chwilowy i średni współczynniki tarcia. Zużycie wagowe próbek mierzono, wykorzystując wagę analityczną z dokładnością 0,1 mg. Prędkość zużycia wagowego określano według wzoru $Z_w = (M_0 - M_r)/t = m_r/t$, gdzie M_0 – początkowa masa powlekanej rolki, M_r – końcowa masa powlekanej rolki, m_r – ubytek masy powłoki na rolce, t – czas tarcia. Zużycie względne całkowite określano według wzoru $Z_c = (m_r + m_k)_i / (m_r + m_k)_1$, gdzie m_k – ubytek masy klocka; i – numer skojarzenia pary trącej; 1 – skojarzenie na bazie nadtapianej laserowo powłoki z proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 bez dodatkowego stopowania.

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

W warunkach tarcia technicznie suchego już po kilkunastu minutach pracy tarcie staje się niestabilnym, wartości momentu tarcia mają coraz większe wahania. W obecności środka smarowego momenty tarcia są bardzo stabilne.

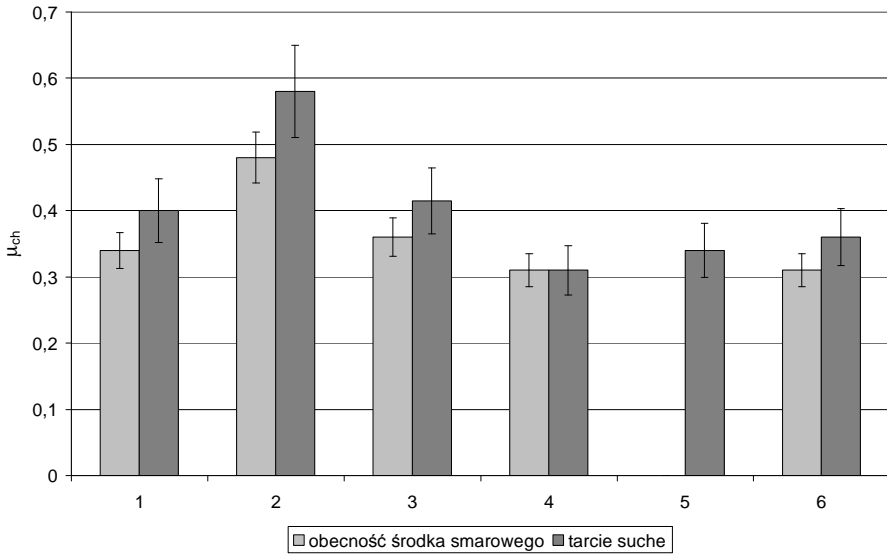
Na **Rysunkach 1, 2** przedstawiono wpływ materiału powłok i technologii nanoszenia powłok na średnie i chwilowe współczynniki tarcia

w badanych skojarzeniach. Najmniejsze wartości średniego współczynnika tarcia zarejestrowano dla skojarzenia „stal C45 – nadtapiana laserowo powłoka na bazie proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 z dodatkowym stopowaniem MoB”. Natomiast najmniejsze wartości chwilowego współczynnika tarcia zarejestrowano dla skojarzenia „stal C45 – nadtapiana laserowo powłoka na bazie proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 z dodatkowym stopowaniem B₄C”. Obecność środka smarowego w większości skojarzeń trących zmniejsza wartości współczynników tarcia.



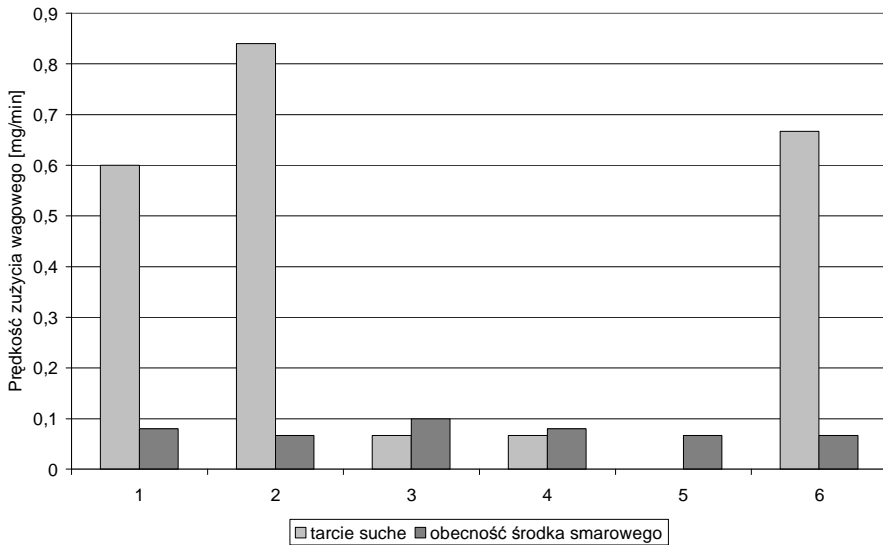
Rys. 1. Średnie współczynniki tarcia w badanych skojarzeniach przy stałym obciążeniu 1000 N (1 – nadtapianie laserowe powłoki na bazie proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 bez dodatkowego stopowania; 2 – nadtapianie laserowe powłoki na bazie proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 z dodatkowym stopowaniem TaB; 3 – nadtapianie laserowe powłoki na bazie proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 z dodatkowym stopowaniem MoB; 4 – nadtapianie laserowe powłoki na bazie proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 z dodatkowym stopowaniem B₄C; 5 – nadtapianie ogniowe powłoki na bazie proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 bez dodatkowego stopowania; 6 – nadtapianie laserowe powłoki na bazie proszku P-Cr16Fe5B4Si4 bez dodatkowego stopowania)

Fig. 1. Mean friction coefficients of tested couplings when constant loading 1000 N (1 – laser washing based on powder P-Cr4Mn2B4Si2V1 without additional alloying; 2 – laser washing based on powder P-Cr4Mn2B4Si2V1 with additional alloying TaB; 3 – laser washing based on P-Cr4Mn2B4Si2V1 with additional alloying MoB; 4 – laser washing based on powder P-Cr4Mn2B4Si2V1 with additional alloying B₄C; 5 – fire washing based on P-Cr4Mn2B4Si2V1 without additional alloying; 6 – laser washing based on powder P-Cr16Fe5B4Si4 without additional alloying)



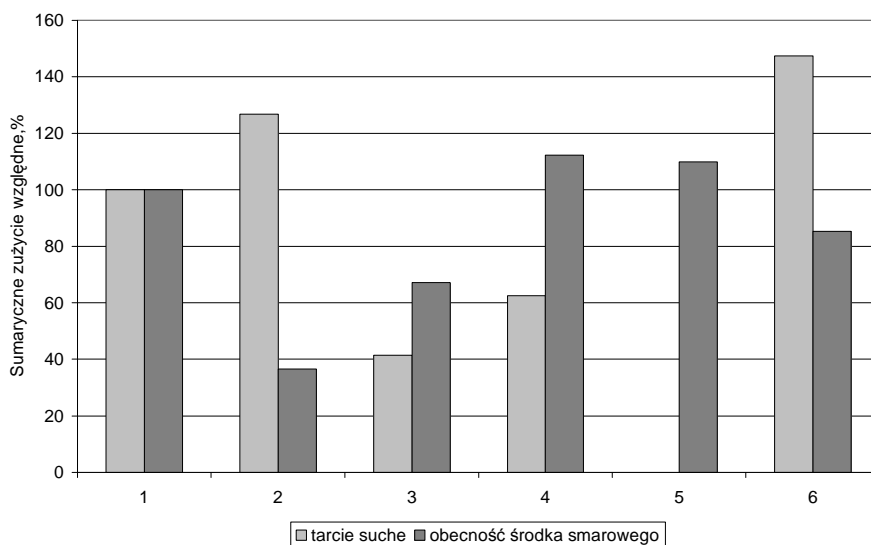
Rys. 2. Chwilowe współczynniki tarcia w badanych skojarzeniach przy stałym obciążeniu 1000 N (oznaczenia zgodnie z podanymi na Rys. 1)

Fig. 2. Instantaneous friction coefficients of tested couplings when constant loading 1000 N (sign under the given in Fig. 1)



Rys. 3. Intensywność zużycia wagowego próbek (oznaczenia zgodnie z podanymi na Rys. 1)

Fig. 3. Intensity of weight wear of rollers (sign under the given in Fig. 1)



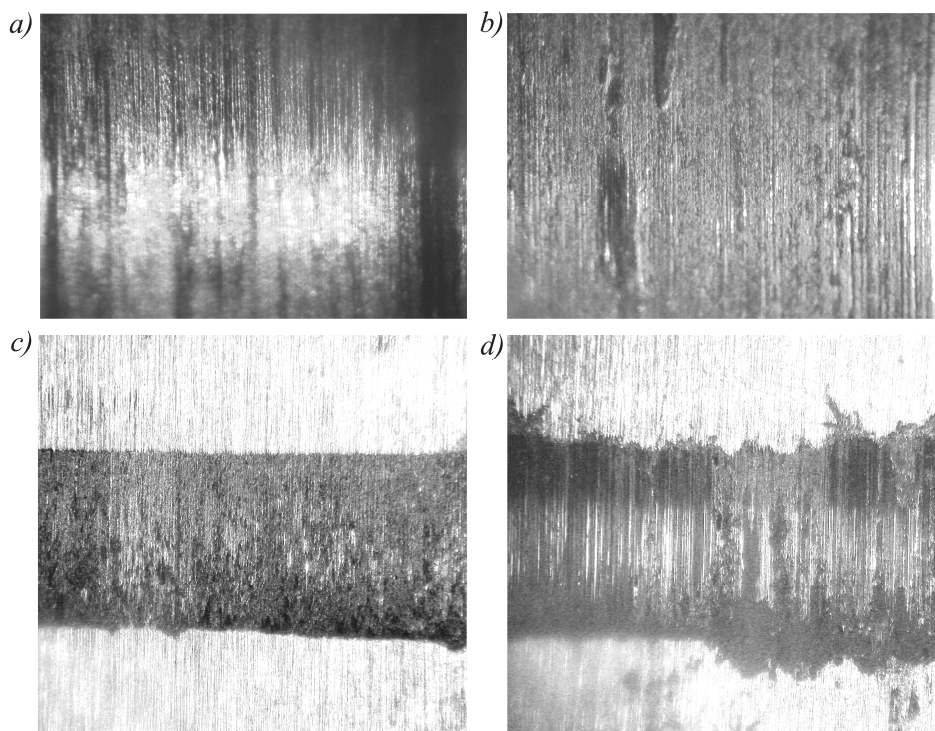
Rys. 4. Sumaryczne zużycie względne próbek i przeciwpróbek (oznaczenia zgodnie z podanymi na Rys. 1)

Fig. 4. Summary relative weight wear of rollers and blocks (sign under the given in Fig. 1)

Na **Rysunkach 3, 4** przedstawiono wpływ materiału powłoki i technologii nanoszenia powłok na intensywności względnego zużycia wagi próbek i oraz całkowitego (sumarycznego) względnego zużycia próbek i przeciwpróbek.

Zauważyć można kilkukrotną przewagę powłoki na bazie proszku P-Cr4Mn2B4Si2V1 z dodatkowym stopowaniem MoB lub B₄C w porównaniu z innymi skojarzeniami w warunkach tarcia technicznie suchego. Obecność środka smarowego niweluje wpływ materiału i technologii naniesienia powłoki, różnica w wartościach zużycia nie przekracza 20%. Porównując zmiany sumarycznego zużycia rolki i klocka, można wyróżnić pozytywny wpływ powłok zawierających cząstki tlenków lub węgliku boru.

Powierzchnie zużycia powłok mają widok typowy dla powierzchni po zużyciu ściernym (**Rysunki 5a, b**). Jednak obserwacja powierzchni zużycia klocków wykazuje, iż na powierzchniach tych zachodzi oprócz zużycia ściernego także zużycie adhezyjne (jasne obszary na **Rysunkach 5c, d**).



Rys. 5. Zużyte powierzchnie rolek (a, b) i klocków (c, d)

Fig. 5. Worn surfaces of rollers (a, b) and blocks (c, d)

WNIOSKI

Przeprowadzone badania właściwości tribologicznych powłok na bazie żelaza pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Struktura powłoki zależy zarówno od składu chemicznego stosowanych proszków wejściowych, jak i od technologii powlekania. Przy nadtopianiu ogniowym tworzy się struktura roztworu twardego na bazie żelaza ze skupiskami fazy węglkoborkowej oraz eutektyk Fe–Fe₂B i Fe–FeB na granicach ziaren. Przy nadtopianiu laserowym powłok bez warstw dodatkowych oraz po nanoszeniu warstw TaB i MoB powstaje metastabilna struktura wzmocniona dendrytami różnych typów z drobnoziarnistą eutektyką borkową między osiami dendrytów. Przy nadtopianiu laserowym powłoki dodatkowo stopowanej węglkiem boru B₄C powstaje drobnoziarnista eutektyka z dużą ilością wtrąceń typu (Cr, Fe)₂₃(C, B)₆.

2. Powłoka na bazie proszku P-Cr₄Mn₂B₄Si₂V₁ z dodatkowym stopowaniem MoB zapewnia najmniejsze wartości średniego współczynnika tarcia, natomiast najmniejsze wartości chwilowego współczynnika tarcia zarejestrowano dla nadtapianej laserowo powłoki na bazie proszku P-Cr₄Mn₂B₄Si₂V₁ z dodatkowym stopowaniem B₄C.
3. W warunkach tarcia technicznie suchego zastosowanie powłok na bazie proszku P-Cr₄Mn₂B₄Si₂V₁ z dodatkowym stopowaniem MoB lub B₄C zapewnia wielokrotne zmniejszenie intensywności zużycia. Obecność środka smarowego zmniejsza wpływ materiału i technologii naniesienia powłoki na intensywność zużycia, aczkolwiek różnica w wartościach nie przekracza 20%.
4. Oprócz zużycia ściernego powierzchni trących zaobserwowano także zużycie adhezyjne.

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. Klimpel A. Napawanie i natryskiwanie cieplne. Technologie. WNT, Warszawa, 2000.
5. Adamiec P., Dziubiński J. Wytwarzanie i właściwości warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych. Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005.
6. Borisov Ū.S. Poroški dlâ gazotermičeskogo napyleniâ. Kiev, Znanie, 1984.
7. Devojno O.G. Tehnologiâ formirovaniâ iznosostojkih poverhnostej lazernym legirovaniem. Minsk, UP „Tehnoprint”, 2001.
8. Feldshtein E., Laber S., Devojno O, Kardapolova M. Odporność na zużycie pokryć z samopłynących stopów niklowych po stopowaniu laserowym w warunkach tarcia suchego. Tribologia: Teoria i Praktyka, 2004, Nr 1, s. 7–17.
9. Paustovskij A.V., Botwinko V.P. Ispolzovanie lazernogo izlučeniâ dlâ naneseniâ i obrabotki pokrytij. Poroškoviâ metallurgii, 1998, Nr 1/2, s. 92–99.

Recenzent:
Witold PIEKOSZEWSKI

Summary

Plasma-sprayed coatings on the base self-fluxing alloys were investigated. Clean ferrous-based alloy P-Cr16Fe5B4Si4 was used as well as the same with the addition of TaB, MoB, and B₄C powders. Fire and laser washing were used to form coatings. The thickness measurements of coatings after processing were from 0.5–0.7 mm, on the base material of steel C45. The metallographic analysis indicated that coating structure depends on the chemical composition of the powder as well as the coating technology. When using an Amsler friction-wear machine, it was determined that when dry technical friction increasingly spreads of torque of friction are observed after some minutes of work, and when oil friction torque are very stable. Additional MoB laser alloying of the coating on a base of P-Cr4Mn2B4Si2V1 powder guarantees a minimal value of the mean friction coefficient. However, the minimal value of the momentary friction coefficient was registered for the coating with additional B₄C laser alloying. During dry technical friction, using a coating on a base of P-Cr4Mn2B4Si2V1 powder with additional MoB or B₄C laser alloying guarantees a multiple decrease in wear intensity. The presence of oil decreases the influence of material and technology of coating on wear intensity, the difference of values is no more than 20%.