



УДК 620.168

Dr hab. inż. prof. Paszczko M.,
Dr hab. inż. prof. Lenik K.,
Dr Barszcz M., Dr inż. Dziejcz K.
(Politechnika Lubelska)

**BADANIA TRIBOLOGICZNE POWŁOKI EUTEKTYCZNEJ FE-MN-C-B
MODYFIKOWANEJ SI, NI, CR, CU WYKAZUJĄCEJ SAMOORGANIZACJĘ
POWIERZCHNI TARCIA**

W pracy przedstawiono wyniki badań tribologicznych powłoki ze stopu eutektycznego Fe-Mn-C-B modyfikowanej Si, Ni, Cr, Cu przy tarcii ze stalą C45. Powłoki nanoszono metodą napawania łukowego z użyciem drutu proszkowego. Badania odporności na zużycie przeprowadzono dla powłok eutektycznych z zastosowaniem węzła tarcia trzpień-tarcza w warunkach tarcia ślizgowego, w modelowym środowisku smarnym. Zastosowano powierzchniowo-aktywny (olej glicerynowy) środek smarny. Po napawaniu i badaniach odporności na zużycie przeanalizowano mikrostrukturę powierzchni tarcia.

Słowa kluczowe: Samoorganizacja, tarcie, powłoka, stop eutektyczny.

The paper concerns the research of tribological and of the friction surface of coating of eutectic alloy Fe-Mn-C-B modified Si, Ni, Cr, Cu with friction with C45 steel. The coatings were obtained by arc welding using a flux-cored wire. Tests of resistance to wear were carried out for eutectic coatings with use of the friction pair pin-on-disc in the conditions of sliding friction, in model lubricating environments. The surface-active (glycerol oil) lubricant was used. After wear resistance tests, the friction surface microstructure was analysed, as well as the surface.

Keywords: Self-organization, friction, coating, eutectic alloys.

Właściwości warstwy wierzchniej mają decydujący wpływ na trwałość eksploatacyjną wyrobów stosowanych na współpracujące elementy maszyn i urządzeń. W czasie eksploatacji na skutek tarcia czyli w wyniku fizycznych i chemicznych zmian warstwy wierzchniej węzeł tarcia zmienia swoje właściwości użytkowe [1-4]. Prowadzi to do zużywania, a w ekstremalnych warunkach pracy do zacierania węzła i do jego zniszczenia. Zużycie na wskutek tarcia powoduje konieczność okresowej regeneracji lub wymiany elementów, zespołów lub maszyn. W wielu przypadkach koszty postoju maszyn i urządzeń, potrzebnego do ich odnowy, wielokrotnie przewyższają koszty materiałów i robocizny. Celowe jest więc świadome wpływanie na tworzenie warstwy wierzchniej o określonych właściwościach, które istotnie zwiększają odporność na zużycie tribologiczne oraz znacznie przedłużają trwałość materiałów konstrukcyjnych. W celu zmniejszenia tarcia i zużycia, najczęściej dąży się do zwiększenia twardości powierzchni. W przemyśle stosuje się wiele metod podwyższenia twardości części maszyn i urządzeń m.in. poprzez zastosowanie nawęglania, azotowania, chromowania, cyjanowania, powierzchniowego hartowania, napawania, PVD, CVD i innych. Wieloletnie doświadczenia pokazały, że w dużej mierze pozwoliło to zwiększyć niezawodność i trwałość współpracujących części maszyn. Jednak wraz ze wzrostem jednostkowych obciążeń oraz pogarszających się

warunków pracy węzłów tarcia (zmiennie i nieustabilizowane wielkości oporów tarcia i zużycia, wzrost temperatury, częściowa utrata środka smarnego lub jego właściwości) tradycyjne metody podwyższenia odporności na zużycie, a tym samym trwałości eksploatacyjnej, nie zawsze w pełni są efektywne. Jednym z rozwiązań przeciwdziałającym tym problemom jest poszukiwanie materiałów, które w procesie tarcia wykazują się samoorganizacją powierzchni. Powoduje to zmiany intensywności zużycia, współczynnika tarcia i chropowatości powierzchni. Według obecnego stanu wiedzy samoorganizacja powierzchni tarcia ma istotny wpływ na poprawę właściwości tribologicznych węzłów tarcia [5-13].

Wykorzystanie na powłoki stopów eutektycznych Fe-Mn-C-B oraz stopowanie różnymi pierwiastkami i sterowanie ich składem chemicznym może istotnie wpływać na samoorganizację powierzchni tarcia

Metodyka badań, materiał do badań. Powłoki nanoszono metodą napawania łukowego GMA (MAG osłona CO₂) z wykorzystaniem opracowanych drutów proszkowych o stopiwie eutektycznym Fe-Mn-C-B modyfikowanym Si, Ni, Cr, Cu. Grubość napoin wynosiła ok. 2-3 mm, a twardość 98 HRB. Do napawania wykorzystano drut o średnicy 2,4 mm o wypełnieniu taśmy metalowej ok. 33%. Skład chemiczny naniesionej powłoki był następujący Mn-6,61%, C-1,45%, B-2,45%, Si-2,11%, Ni-7,45%, Cr-4,90%, Cu-4,91%, Fe-reszta (% masowy).

Powłoki poddano badaniom tribologicznym. Do badań wykorzystano zmodyfikowany tribotester typu Amsler. Tester pozwala na prowadzenie badań zgodnie z metodami określonymi w normach PN-79/H-04329, PN-82/H-04332. Testy tribologiczne zrealizowano przy następujących parametrach:

- styk: rozłożony (trzcień-tarcza),
- rodzaj ruchu: ślizgowy,
- średnica trzpienia: ϕ 7 mm,
- średnica i grubość tarczy: ϕ 50x8 mm,
- prędkość poślizgu: 0,4 m/s,
- obciążenie styku: 20 MPa
- droga tarcia, w każdym teście: 5700 m,
- styk smarowany: olej glicerynowy, smar wazelinowy,
- liczba powtórzeń: 3-5,
- czas jednej próby: 6 godz.,
- temperatura otoczenia: 23±1°C.

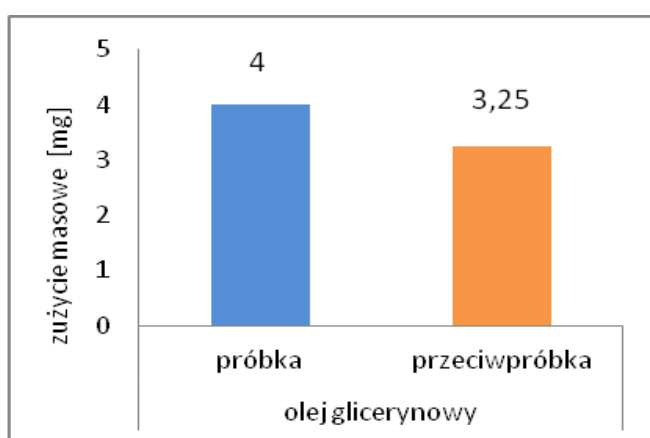
Węzeł tarcia składał się z nieruchomego trzpienia (próbki) dociskanego odpowiednią siłą do obracającej się z zadaną prędkością tarczy (przeciwpróbki). Do badań użyto próbek wykonanych ze stopu eutektycznego Fe-Mn-C-B modyfikowanego Si, Ni, Cr, Cu. Przeciwpróbkę wykonano ze stali C45. Jej twardość po ulepszeniu cieplnym wynosiła 52-54 HRC.

Powierzchnie próbek i przeciwpróbek poddano dodatkowym badaniom. Przeprowadzono pomiary chropowatości, zbadano mikrostrukturę powierzchni tarcia oraz powierzchniowy i głębokościowy rozkład pierwiastków i oceniono ich prawdopodobne struktury. Pomiaru chropowatości powierzchni warstw wierzchnich (przed i po testach tribologicznych) dokonano za pomocą profilometru igłowego Surtronic 3+ firmy Talylor Hobson. Urządzenie wyposażono w igłę diamentową. Pomiary zostały wykonane prostopadłe do kierunku śladów obróbki i drogi tarcia na odcinku o długości 4 mm z dokładnością pomiaru ±0,02 μm. Jako wielkość opisującą chropowatość powierzchni przyjęto parametr *Ra* wg normy PN-EN ISO 4287:1999. Do

oceny mikrostruktury powierzchni tarcia wykorzystano mikroskop metalograficzny Nikon Eclipse MA 200. Zdjęcia otrzymano w postaci cyfrowej i obrabiano za pomocą programu NIS-Elements. W celu otrzymania większych powiększeń powierzchnie tarcia obserwowano również za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego SEM. Wykorzystano skaningowy mikroskop elektronowy typu Quanta 3D FEG firmy FEI. Badania SEM zostały wykonane w warunkach wysokiej próżni (ciśnienie $6 \cdot 10^{-4}$ Pa) przy wykorzystaniu detektora elektronów wtórnych ET SED (Everhad-Tornley Secondary Electron Detector). Dla wysokiej próżni zdolność rozdzielcza mikroskopu przy napięciu przyspieszającym 30 kV wynosiła 1,2 nm.

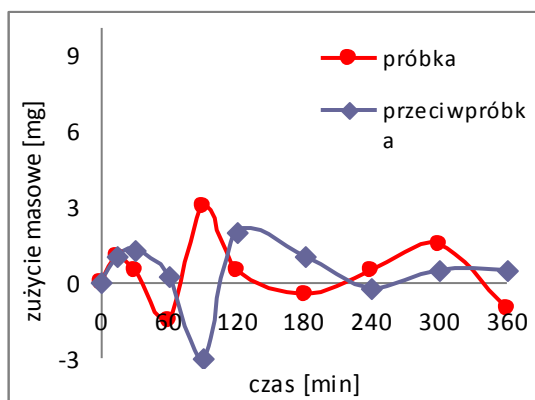
3. Wyniki badań i ich dyskusja

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów średniego zużycia masowego powłok oraz odpowiadającym im przeciwpróbek po 6 godzinach procesu tarcia przy smarowaniu olejem glicerynowym. Średnie zużycie masowe powłok wynosiło 4 mg a przeciwpróbek 3,25 mg.



Rys. 1. Zestawienie zużycia masowego powłok i przeciwpróbek po zakończeniu testów tribologicznych przy nacisku jednostkowym 20 MPa i smarowaniu olejem glicerynowym

Dla lepszego zobrazowania przebiegu procesu tarcia wyniki pomiaru średniego zużycia masowego powłok oraz odpowiadającym im przeciwpróbek przedstawiono w funkcji czasu tarcia (rys. 2).

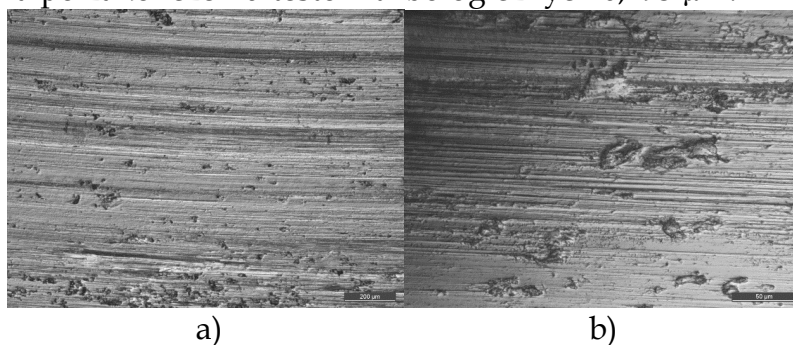


Rys. 2. Przebieg zużycia masowego powłok i przeciwpróbek przy tarcu w oleju glicerynowym przy nacisku jednostkowym 20 MPa

Analiza uzyskanych wyników badań (rys. 1 i 2) wykazała, że przy smarowaniu powierzchniowo-aktywnym środkiem smarnym (olej glicerynowy) przez cały okres testów występuje zmienne zużycie współpracujących elementów (przyrost i ubytek masy). Takie zjawisko można wyjaśnić faktem, że istnieje przenoszenie materiału z jednej powierzchni na drugą i z powrotem. Może to prowadzić do tworzenia się na powierzchniach tarcia cienkiej warstwy (filmu) o specyficznych właściwościach. Warstwa taka spełnia zadania ochrony trących o siebie powierzchni przed bezpośrednim kontaktowaniem, przyczyniając się do zmniejszenia tempa zużywania materiału oraz mniejszej wartości współczynnika tarcia. Wyjaśnia to zauważalny efekt niewielkiego zużycia współpracujących elementów. Współczynnik tarcia przy smarowaniu olejem glicerynowym dla analizowanych skojarzeń wynosił 0,011.

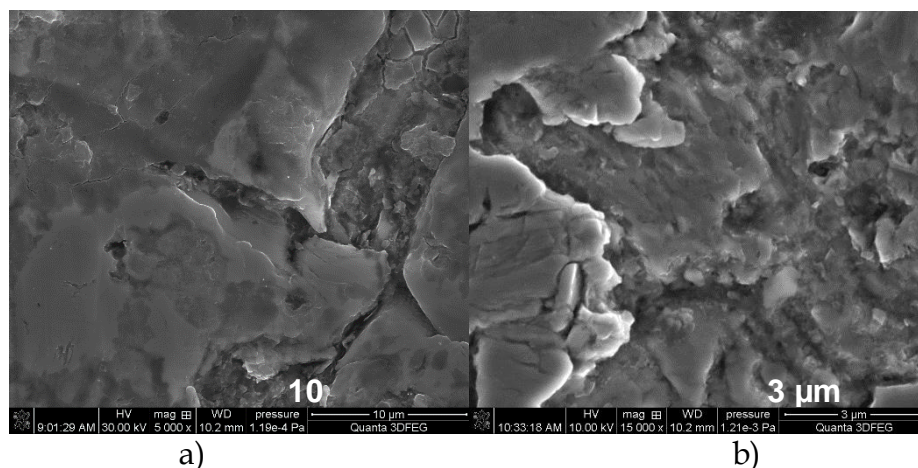
Przeprowadzone badania tribologiczne jednoznacznie wykazały, że współpraca powłok ze stopu eutektycznego z przeciwpróbką ze stali C45 przy smarowaniu olejem glicerynowym powoduje znaczną poprawę właściwości tribologicznych niż przy smarowaniu smarem wazelinowym. Dlatego do dalszej oceny i analizy przyjęto powłoki po testach tribologicznych smarowanych olejem glicerynowym.

W kolejnym etapie prac zbadano mikrostrukturę powierzchni tarcia. Obserwacjom poddano ślady tarcia powstałe na powierzchni powłok ze stopu eutektycznego i powierzchni przeciwpróbek smarowanych olejem glicerynowym (rys. 3). Powierzchnia tarcia jest praktycznie całkowicie pokryta produktami triboreakcji. Wytworzyła się eksploatacyjna warstwa wierzchnia (EWW). Praktycznie zanikają bruzdy i rysy (powierzchnia jest bardzo gładka) – rys. 3 b. Widać wyraźny spadek chropowatości powierzchni. Chropowatość powierzchni powłoki przed procesem tarcia wynosiła 1,382 μm a po zakończeniu testów tribologicznych 0,493 μm .



Rys. 3. Widok powierzchni śladu tarcia na powłoce ze stopu eutektycznego po zakończeniu testów tribologicznych przy nacisku jednostkowym 20 MPa i smarowaniu olejem glicerynowym: $\times 100$ (a), $\times 500$ (b)

Widok SEM śladów tarcia powstałych na powłoce ze stopu eutektycznego smarowanego olejem glicerynowym przy różnych powiększeniach przedstawiono na rys. 4. Powierzchnia tarcia charakteryzuje się budową płatkowo-warstwową (rys. 4 a). Widoczne są różnice w kształcie i wielkości warstw i płatków. Poszczególne warstwy i płatki leżą na różnych poziomach i pokrywają się wzajemnie. Posiadają także widoczne odkształcenia plastyczne. Można zauważyć odwarstwione struktury wtórne. Przy powiększeniach $\times 500000$ (rys. 4 b) widoczne są kuliste struktury o rozmiarach rzędu 15 nm. Według H. Kuźmina i innych [14] struktury płatkowo-warstwowe mogą tworzyć się pod warunkiem, że elementy węzła tarcia zawierają substancje, które sprzyjają kształtowaniu warstw w wyniku reakcji tribochemicznych.



Rys. 4. Zdjęcia śladów tarcia powstałych na powłoce ze stopu eutektycznego przy smarowaniu olejem glicerynowym: pow. $\times 5000$ (a), pow. $\times 500000$ (b)

Wnioski. Przeprowadzone badania tribologiczne jednoznacznie wykazały, że współpraca powłok ze stopu eutektycznego z przeciwpróbką ze stali C45 przy smarowaniu powierzchniowo-aktywnym środkiem smarnym (olej glicerynowy) powoduje znaczną poprawę właściwości tribologicznych niż przy smarowaniu powierzchniowo-nieaktywnym środkiem smarnym (smar wazelinowy). Otrzymany efekt związany jest z samoorganizacją powierzchni tarcia. Stwierdzono, że w warstwie wierzchniej w procesie tarcia zachodzą przemiany tribochemiczne. Powierzchnia tarcia jest praktycznie całkowicie pokryta produktami triboreakcji. Wytworzyła się nowa EWW. Powierzchnia tarcia powłoki ma budowę płatkowo-warstwową.

LITERATURA

1. Adamiec P., Dziubiński J.: Wytwarzanie i właściwości warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005.
2. Adamiec P., Dziubiński J.: Regeneracja i wytwarzanie warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
3. Stachowiak G.: Wear - Materials, Mechanisms and Practice, Tribology in Practice Series, John Wiley and Sons, Ltd., Chichester 2005.
4. Stachowiak G., Batchelor A. W.: Engineering Tribology, Second Edition, Butterworth-Heinemann, 2000.
5. Kosteczki B.I.: Fundamentalnyje zakonomierności trenija i iznosa, Kijew 1981.
6. Kato H., Komai K.: Tribofilm formation and mild wear by tribo-sintering of nanometer-sized oxide particles on rubbing steel surfaces, *Wear* 262 (2007), p. 36-41.
7. Gershman I. S., Bushe N. A.: Thin films and self-organization during friction under the current collection conditions, *Surface & Coatings Technology* 186, 2004, p. 405-411.
8. Fox-Rabinovich G. S., Totten G. E.: Self-organization during friction, *Advance Surface Engineered Materials and Systems Design*, CRC Taylor and Francis Group, Boca Raton, 2006.
9. Fox-Rabinovich G. S., Kovalev A. I., Shuster L. Sh., Bokiyy Yu. F., Dosbayeva O. K., Wainstein D. L., Mishina V. P.: On characteristic features of alloying HSS-based deformed compound powder materials with consideration for tool self-organization at cutting 2. Cutting tool friction control due to the alloying of the HSS-based deformed compound powder material, *Wear* 214 (1998), p. 279-286.
10. Garkunov D. N.: Tribotechnika, Mashinostroenie, Moscow 1985 (in Russian).

11. Garkunov D. N. : Tribotechnology. Wear and No-wear. 4th ed. MAA Publishing House, Moscow 2001.
12. Bakli B. : Surface phenomena during adhesion and friction interaction, Mashinostroenie Published House, Moscow, 1986.
13. Pashechko M., Lenik K. : Segregation of atoms of the eutectic alloys Fe-Mn-C-B-Si-Ni-Cratfrictionwear, *Wear* 267 (2009), p. 1301-1304.
14. Kuźmin N. N., Szuwałow E. A, Trankovsaya G. R., Muravieva T. I. : Methods of analysis of surface structures formed during friction. *Friction and wear*, 1996, T.17, No 4, p. 480–486 (in Russian).

Рецензент: проф. Голота Януш.