

Andrzej KOTNAROWSKI

WYTWARZANIE POWŁOK OCHRONNYCH SKOJARZEŃ TARCIOWYCH ŚRODKÓW TRANSPORTU W PROCESACH TARCIA

Artykuł dotyczy aplikacji osiągnięć tribologii i nanotechnologii w eksploatacji środków transportu. Zostały w nim przedstawione wybrane metody konstituowania warstw ochronnych na współpracujących tarciowo powierzchniach elementów węzłów kinematycznych, minimalizujące niekorzystne skutki tarcia, takie jak opory ruchu i zużycie. Zaproponowano wytwarzanie tych warstw bezpośrednio w procesie eksploatacji urządzenia technicznego, z zastosowaniem – jako materiału warstwotwórczego – nanocząstek miedzi, dodawanych do środków smarowych, stosowanych w węzłach tarcia. Skuteczność proponowanej metody dokumentują zaprezentowane w artykule wyniki badań własnych.

GENERATION OF PROTECTIVE LAYERS OF VEHICLES FRICTION JOINTS IN COURSE OF FRICTION PROCESS

The paper concerns application of tribology and nanotechnology achievements in means of transport operation. Selected methods were presented of protective layers constituting on rubbing surfaces of kinematic joints elements minimizing effects of friction like motion resistance and wear. The proposal was presented of these layers generation directly at the beginning period of technical equipment operation process with using copper nanoparticles as layer-forming material added to lubricants applied in friction joints. Effectiveness of proposed method is proved by the results of own examination presented in the paper.

1. WSTĘP

Warstwy powierzchniowe, do których zalicza się warstwy wierzchnie i powłoki, są dobierane w zależności od przewidywanych warunków eksploatacji części maszyn i innych urządzeń technicznych. Z tego powodu ich liczba jest również bardzo duża, nawet jeśli ograniczy się ją poprzez dobieranie jednego rodzaju warstwy powierzchniowej do całej grupy zastosowań, podobnych pod względem wymaganych cech tych warstw. Należy zauważyć, że wysoki stopień techniki wytwarzania większości warstw powierzchniowych wpływa w znacznym stopniu nie tylko na bezpośrednie koszty uzyskiwania tych warstw, ale również na inne koszty społeczne, związane chociażby z zatruciem środowiska, czy z nadmiernym rozwojem gałęzi przemysłu, produkujących coraz większą liczbę niezbędnych urządzeń technicznych.

Nasuwa się zatem wniosek, że oprócz opracowywania (w wielu przypadkach bezdyskusyjnie niezbędnych) coraz nowszych, zaawansowanych technicznie metod wytwarzania technologicznych warstw powierzchniowych, wymagających stosowania skomplikowanych, i również w większości nowych lub udoskonalonych urządzeń, część wysiłków naukowców, zgodnie z generalną zasadą, że założeniem twórczej działalności technicznej powinno być dążenie do prostoty rozwiązań, powinna zostać ukierunkowana na opracowanie i rozwój koncepcji wytwarzania warstw powierzchniowych bezpośrednio w procesie eksploatacji, jako tak zwanych eksploatacyjnych warstw powierzchniowych.

2. WARSTWY POWIERZCHNIOWE

Koncepcja wytwarzania warstw powierzchniowych, w tym także powłok minimalizujących opory tarcia i chroniących elementy skojarzeń tarciovych przed zużyciem, oparta jest na obserwacji niektórych organizmów żywych, których kończyny wyposażone zostały na drodze ewolucyjnej w stawy, pracujące prawie przez całe życie, a więc nawet dziesiątki lat, bez widocznych objawów zużycia i przy małych oporach ruchu. Dzieje się tak dzięki tworzeniu się i ciągłym odnawianiu na współpracujących powierzchniach elementów stawów powierzchniowych warstw ochronnych minimalizujących opory tarcia, stanowiących doskonały przykład eksploatacyjnych warstw powierzchniowych [19].

2.1 Warstwy adaptacyjne

Etapem przejściowym na drodze do stosowania ochronnych warstw powierzchniowych, powstających całkowicie w procesie eksploatacji, są warstwy (powłoki) adaptacyjne, należące do klasy, tak zwanych, inteligentnych materiałów. Powłoki te nakładane w procesie technologicznym na przyszłe powierzchnie tarcia są tak zaprojektowane, aby ich powierzchniowy skład chemiczny i struktura zmieniały się w funkcji zmian środowiska ich pracy, celem minimalizacji oporów tarcia i zużycia współpracujących elementów [1, 15]. Stanowią one wielofazową strukturę, w której część faz zapewnia wytrzymałość mechaniczną, a reszta stanowi stałe źródło smarowy. Własności chemiczne tej struktury zmieniają się w sposób odwracalny w obszarze kontaktu tarciovego celem wytwarzania fazy smarnej pod wpływem obciążenia i środowiska pracy. Przykładem takiego rozwiązania jest powłoka o symbolu YSZ/Au/MoS₂//DLC [15] w której wysokie obciążenia są przenoszone przez fazę tlenkową YSZ i fazę diamentopodobną DLC. Smarowanie natomiast zapewniają inne fazy, w zależności od temperatury. W temperaturze powyżej 300°C smarowanie zapewnia faza Au, w temperaturze poniżej 300°C w próżni lub w suchym środowisku faza MoS₂, a w środowisku wilgotnym grafit, powstający z fazy DLC.

2.2 Warstwy wytwarzane w procesie eksploatacji

Obiecujące perspektywy stwarzają, znajdujące się jeszcze w sferze badań rozpoznawczych, metody tworzenia eksploatacyjnych warstw powierzchniowych o korzystnych właściwościach tribologicznych z wykorzystaniem nanostruktur, w tym nanocząstek metali, jako dodatków do środków smarowych [5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 17, 18]. Wybór nanocząstek do tego typu zastosowań związany jest z ich szczególnymi właściwościami

fizykochemicznymi, wśród których szczególnie duża aktywność powierzchniowa i małe wymiary umożliwiają im tworzenie warstw ochronnych (przede wszystkim o charakterze powłok) na współpracujących tarciowo powierzchniach skojarzeń ruchowych. Taki kierunek doskonalenia właściwości eksploatacyjnych kinematycznych węzłów maszyn i urządzeń potwierdzają wyniki eksperymentów, na razie jeszcze nielicznej grupy badaczy, zajmujących się tą problematyką. Przeświadczenie o celowości stosowania nanostruktur, w tym nanocząstek metali, wynika z kilku intuicyjnych założeń, dotyczących ich własności, które także znajdują swoje potwierdzenie empiryczne [14]. Najważniejszą własnością nanostruktur w kontekście ich użycia jako dodatków do środków smarowych (przede wszystkim olejów) jest ich zdolność do tworzenia w olejach trwałych układów koloidalnych – zoli. Sposobem na zwiększenie tej zdolności w przypadku nanocząstek metali jest ich powleczenie warstewką odpowiednio dobranych cząsteczek związków organicznych (związków powierzchniowo czynnych), zbudowanych z części (grupy) o charakterze polarnym i długiego łańcucha alkilowego. Grupa polarna powinna mieć silne właściwości chemisorpcyjne, umożliwiające trwałe połączenie cząsteczek związku powierzchniowo czynnego z nanocząstką metalu. Natomiast łańcuch alkilowy powinien mieć tak dobraną długość i strukturę, aby zapewnić dobrą rozpuszczalność tych nanocząstek w oleju smarowym i powstanie zolu liofilowego. Ze względu na swe małe rozmiary i zdolność do tworzenia trwałych, homogenicznych roztworów nanocząstki łatwo docierają z olejem smarowym do strefy tarcia, gdzie, dzięki swej dużej energii powierzchniowej, są chętnie adsorbowane przez współpracujące powierzchnie.

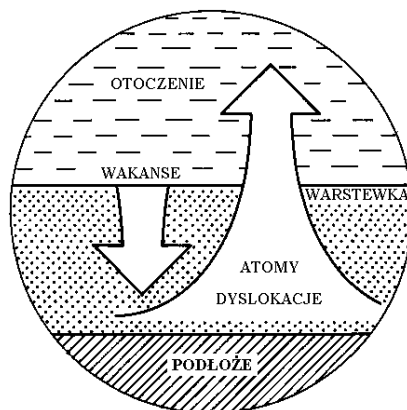
Wyróżnia się dwie podstawowe grupy mechanizmów oddziaływania nanocząstek na przebieg procesu tarcia [12]. Pierwsza obejmuje mechanizmy związane z bezpośrednim wpływem nanocząstek na poprawę charakterystyk tribologicznych węzła tarcia. Należy do nich działanie zawartych w środku smarowym nanocząstek, jak kulek łożyskowych, pośredniczących w tarcu pomiędzy współpracującymi powierzchniami [14, 18]. Do pierwszej grupy mechanizmów należy również tworzenie przez nanocząstki, zwłaszcza metali miękkich (miedzi, srebra, ołowiu, bizmutu), cienkich warstewek ochronnych (warstw granicznych) na powierzchniach tarcia [2, 3, 6, 17]. Według hipotez dotyczących tego mechanizmu nanocząstki miękkich metali, zawarte w środku smarowym, mogą osadzać się na powierzchniach tarcia, tworząc warstewki metaliczne, zmniejszające (przenoszące) naprężenia styczne w styku tarciovym oraz wyrównujące mikrouszkodzenia tych powierzchni, poprzez wypełnianie ubytków i zmniejszanie mikrowystępów. W efekcie chropowatość staje się minimalna, co sprzyja wyzwalaniu naprężeń, redukcji tarcia oraz przeciwdziałania zużyciu. Tego rodzaju system tribologiczny uzyskuje również zdolność samokompensacji zużycia [14].

Druga grupa mechanizmów wpływania przez nanocząstki (również nanocząstki metali) na przebieg procesów tribologicznych związana jest z ich wtórnym oddziaływaniem na powierzchnie tarcia. Polegać może ono na kompensowaniu przez nanocząstki ubytków masy współpracujących elementów, spowodowanych, na przykład, mikrouszkodzeniami adhezyjnymi [13]. Ponadto nanocząstki, zwłaszcza o większej twardości, mogą działać jak ścierniwo, powodując polerowanie współpracujących powierzchni i redukcję ich chropowatości [18].

Poza znajdującymi się obecnie w sferze badań początkowych metodami wykorzystania nanostruktur w ogóle, a nanocząstek metali w szczególności, istnieje już opracowany i stosowany w technice sposób konstituowania warstw powierzchniowych w procesach

eksploatacji, jako eksploatacyjnych warstw powierzchniowych, przyczyniających się do zmniejszenia tarcia i zużycia elementów współpracujących w skojarzeniach tribologicznych. Stosowanie tego sposobu nie wymaga rozwoju całych gałęzi przemysłu, wytwarzających niezbędne urządzenia technologiczne. Niestety, jak dotąd takie technologie nie są rozwijane i nie znajdują szerszego zastosowania, co wiąże się z brakiem odpowiednich środków na badania i skutkuje, między innymi, brakiem zainteresowania naukowców.

Tym sposobem uzyskiwania eksploatacyjnych warstw ochronnych jest realizacja w styku tarciovym (w którym współpracują ze sobą element stalowy z elementem stalowym, żeliwnym lub ze stopu miedzi) zjawiska bezzużyciowego tarcia, zwanego też od nazwiska jednego z odkrywców zjawiskiem Garkunowa. Zjawisko to, w najogólniejszym ujęciu, polega na funkcjonowaniu systemu tribologicznego w warunkach bezzużyciowego tarcia – stanu charakterystycznego dla stawów organizmów żywych (od stawonogów poczynając a na ssakach kończąc), które są systemami tribologicznymi zamkniętymi, dobrze izolowanymi od wpływów zewnętrznych [4]. Zasadniczym warunkiem wystąpienia zjawiska selektywnego przenoszenia jest umiejscowienie procesu tarcia w cienkiej warstewce metalicznej, zdolnej do dyssypacji energii i materii. Zdolność taką posiada również warstewka olejowa, jednak tylko w warunkach smarowania hydrodynamicznego. Cienka, metaliczna warstewka może posiadać taką zdolność w warunkach smarowania granicznego, gdy z jej powierzchni uwalniane są atomy, a dyslokacje wychodzą z jej wnętrza na powierzchnię. Dyssypację można przedstawić jako zachodzącą w tej warstewce wzajemną absorpcję dwóch, skierowanych w przeciwnych kierunkach, strumieni dyfuzyjnych (rys. 1). Strumień dyslokacji i atomów porusza się w kierunku powierzchni warstewki, a strumień wakansów porusza się od powierzchni w głąb warstewki.



Rys. 1. Procesy absorpcyjne zachodzące w warstewce lokalizującej proces tarcia

Dyslokacje powstają w wyniku deformowania warstewki, a wakanse w wyniku specyficznego działania środka smarowego. Polega ono na tym, że znajdujące się w środku smarowym ligandy łączą się na powierzchni warstewki z atomami (posiadającymi wolne wiązania), tworząc związki kompleksowe. Im wyższe obciążenie i temperatura, tym więcej tworzy się takich związków. Mogą one tworzyć płaszczyny poślizgu, co znacznie

zmniejsza tarcie. Powstałe związki kompleksowe, dostając się w mniej obciążone obszary strefy tarcia, częściowo rozpadają się, uwalniając pobrane uprzednio z powierzchni warstewki atomy metalu, które w postaci jonów, dzięki zjawisku elektroforezy, powracają do obszaru tarcia łącząc się ponownie z warstewką. Podtrzymująca się wymiana jonowa zamyka krąg wymiany materii, dzięki czemu proces tarcia przebiega praktycznie bezzużyciowo. Zasadniczą rolę w równowadze procesu odgrywa selektywna zdolność samych ligandów do tworzenia wiązań chemicznych z atomami z powierzchni tarcia. Materiały pary tarciowej oraz środek smarowy powinny być zatem dobrane w taki sposób, aby nieprzerwanie podtrzymywany był proces dyssypacji, którego przebieg nie byłby zakłócany powstawaniem produktów zużycia, pojawiających się w wyniku oddziaływania smaru i okształceń występujących w strefie tarcia.

Omawiany system tribologiczny pracuje w warunkach równowagi, dzięki oddziaływaniu sprzężenia zwrotnego. W przypadku, gdy przy pewnym potencjale chemicznym ilość tworzących się dyslokacji przekroczy ilość wakansów, tworzy się skupienie dyslokacji. Kumulacja dyslokacji prowadzi do wzrostu oporów tarcia, powodujących z kolei wzrost temperatury i zmianę potencjału chemicznego, co nasila selektywne uwalnianie atomów z powierzchni warstewki, w wyniku czego zwiększa się znów ilość wakansów. Dzięki opisanemu wyżej działaniu sprzężenia zwrotnego odtwarzana jest równowaga systemu tribologicznego, a sam proces tarcia przebiega w sposób oscylacyjny. Uważa się, że selektywne przenoszenie jest procesem adsorpcyjno - chemicznym. Pozostająca po selektywnym uwalnianiu atomów nasycona wakansami warstewka katodowa podlega oddziaływaniu substancji powierzchniowo czynnych, tworzących się w trakcie przebiegu zjawiska lub celowo wprowadzonych do smaru. Powoduje to powstawanie specyficznego stanu metalu (z którego zbudowana jest warstewka), charakteryzującego się możliwością swobodnego wydostawania się dyslokacji (w trakcie odkształcania warstewki) na jej powierzchnię.

Zjawisko Garkunowa może zachodzić w różnych układach materiałowych: stal lub żeliwo – stop miedzi, stal lub żeliwo – stal lub żeliwo, przy czym w układach, w których żaden ze współpracujących tarciowo elementów nie zawiera miedzi, musi zostać ona dostarczona w inny sposób, na przykład, w środku smarowym.

Zjawisko Garkunowa, przebiegające podczas współpracy elementu stalowego (żeliwnego) z elementem ze stopu miedzi, nazywa się zwykle procesem selektywnego przenoszenia, ponieważ w jego początkowym etapie warstewka miedziana na elemencie ze stopu miedzi powstaje w wyniku selektywnego przechodzenia składników stopowych do środka smarowego. W efekcie w warstwie powierzchniowej elementu ze stopu miedzi pozostaje czysta miedź, która jest przenoszona tarciowo również na stalowy lub żeliwny element skojarzenia ciernego. Zjawisko selektywnego przenoszenia cechuje się zatem tym, że na każdym ze współpracujących elementów tworzą się warstewki o identycznym składzie, natomiast o innym charakterze. Warstewka miedziana na elemencie ze stopu miedzi stanowi warstwę wierzchnią, natomiast na elemencie stalowym jest powłoką.

W przypadku elementów stalowych lub żeliwnych, współpracujących, na przykład, w sprzężarkach urządzeń chłodniczych, ochronna warstewka miedziana (powłoka) tworzy się na ich powierzchni w wyniku współdziałania powierzchniowo-aktywnych składników cieczy chłodzącej i substancji smarującej z miedzianymi rurkami parownika [4, 16]. Organiczne związki miedzi, powstające na drodze reakcji chemicznych, wędrują z olejem do strefy tarcia, gdzie są adsorbowane przez współpracujące, stalowe powierzchnie

panewek i czopów łożysk głównych, i korbowodowych oraz pierścieni tłokowych i cylindrów, tworząc cienkie warstewki miedzi o grubości $1\div 2\ \mu\text{m}$. Podobnie powstają warstewki miedziane na elementach stalowych, współpracujących ze sobą w smarach metaloplaterujących [4].

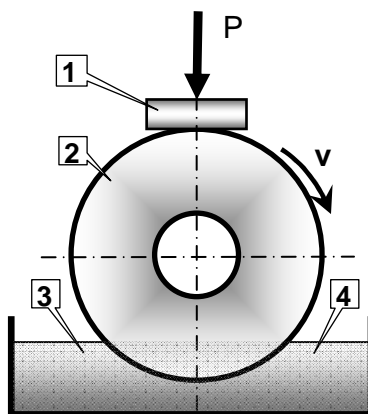
Mechanizm bezzużyciowego tarcia w technice oraz towarzyszące mu zjawiska i warunki jego występowania są jeszcze niedostatecznie poznane, pomimo upływu tak długiego okresu czasu od dokonanego przez Garkunowa odkrycia i wieloletnich prób jego celowego stosowania w węzłach tarcia.

Dotychczas osiągnięte rezultaty badań bezzużyciowego tarcia w warunkach smarowania mieszanego oraz pozytywne wyniki badań nad możliwościami stosowania mikroproszków niektórych metali, jako dodatków do środków smarowych, poprawiających charakterystyki tribologiczne smarowanych nimi skojarzeń tarciovych, stwarzają przesłanki do zastosowania w tym celu także nanoproszków tych metali. Nanoproszki metali, ze względu na swe wyjątkowe właściwości, powinny jeszcze korzystniej oddziaływać na skojarzenia tribologiczne w efekcie procesu wytwarzania na elementach kinematycznych węzłów maszyn warstw powierzchniowych korzystnie modyfikujących procesy tarciove i chroniących współpracujące tarciove części przed zużyciem. Warstwy takie mogą być konstituowane bezpośrednio podczas eksploatacji, a nie na etapie produkcji części.

3. BADANIA WPŁYWU NANOCZĄSTEK MIEDZI NA PROCESY TRIBOLOGICZNE

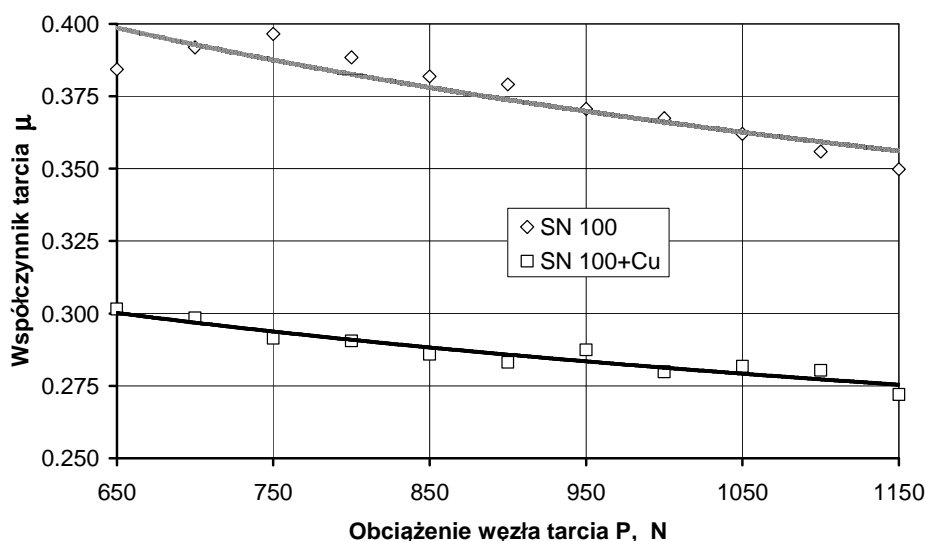
3.1 Badania tribologiczne

Do badań tribologicznych stanowisko badawcze, wyposażone w tester tribologiczny T-05 (produkcji ITeE) ze zmodyfikowanym modelowym węzłem tarciove, przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 2. Modelowy węzeł tarciove zastosowany w testerze T-05

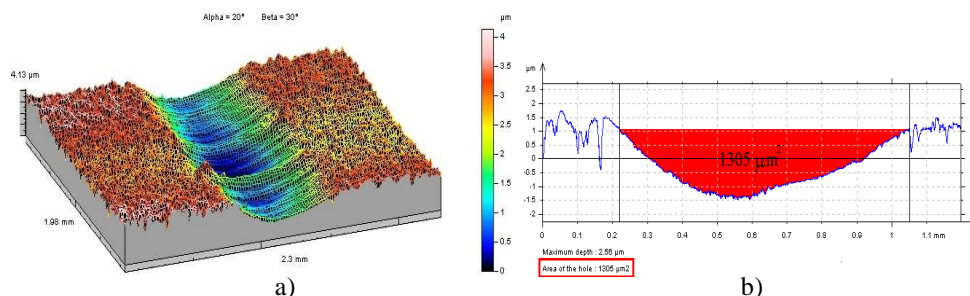
Węzeł tarciowy składał się z próbki (1), wykonanej z węgla spiekane S20S w kształcie płytki o wymiarach (12 x 12 x 2) mm (rys. 2) oraz z przeciwpółki (2), którą stanowił wykonany ze stali C45 pierścień, o średnicy zewnętrznej 40 mm i grubości 10 mm. Przeciwpółka zanurzona była w oleju smarowym (3). Jako środek smarowy zastosowano olej podstawowy SN 100 o lepkości kinematycznej $\nu_{40} \approx 19,4 \text{ mm}^2/\text{s}$. Do modyfikacji oleju zastosowano dodatek nanocząstek miedzi (4), o średniej wielkości 66 nm. Stężenie nanocząstek miedzi w oleju wynosiło 0,25% w stosunku wagowym. W wyniku przeprowadzonych badań wyznaczono charakterystykę tribologiczną skojarzenia tarcioowego przedstawioną na rysunku 3, która dokumentuje korzystny wpływ na opory tarcia modyfikacji oleju smarowego za pomocą nanocząstek miedzi. Opory tarcia zmniejszyły się średnio o 25%.



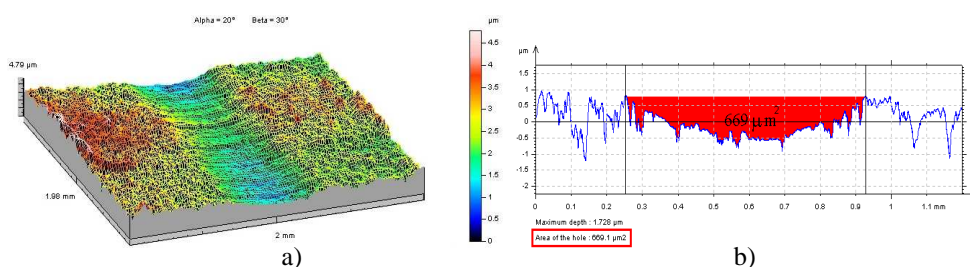
Rys. 3. Zależność współczynnika tarcia od obciążenia wężła tarcia stal C45 – węgiel spiekany S20S smarowanego olejem SN100 bez (\triangle) i z (\square) z dodatkiem 0,25% (wagowo) nanocząstek miedzi o średniej wielkości 66 nm

3.2 Badania materiałowe

Celem badań materiałowych była ocena zużycia próbek w procesie tarcia oraz wyjaśnienie mechanizmu powstawania metalowych warstewek ochronnych na powierzchniach tarcia. Badania wielkości zużycia wykonano za pomocą profilometru skaningowego Form Talysurf Series 2 firmy Taylor – Hobson. W efekcie tych badań uzyskano izometryczne obrazy powierzchni, poddanych procesowi tarcia, dokumentujące zmiany wywołane przez ten proces (rys. 4a i 5a) i umożliwiające dokonanie obliczeń wielkości zużycia. Do oceny zużycia zastosowano wskaźnik, będący wartością pola powierzchni przekroju ścieżki tarcia, dokonanego płaszczyzną prostopadłą do osi obrotu przeciwpółki (rys. 4b i 5b).



Rys. 4. Próbkę z węgla spiekanego S20S po procesie tarcia w oleju SN 100 bez dodatku: a) obraz powierzchni próbki, b) zużycie



Rys. 5. Próbkę z węgla spiekanego S20S po procesie tarcia w oleju SN 100 z dodatkiem nanoproszku miedzi: a) obraz powierzchni próbki, b) zużycie

Badania składu chemicznego warstwy wierzchniej próbek wykonano metodą mikroanalizy rentgenowskiej za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Hitachi S-2460N z mikroanalizatorem rentgenowskim Voyager 3050 firmy Noran-USA, wyposażonym w układ dyspersji energii. Umożliwił on identyfikację pierwiastków we wzbudzonej mikroobszarze próbki (analiza jakościowa) oraz wyznaczenie ich udziału atomowego i masowego (analiza ilościowa). Analizy dokonano w dwóch miejscach każdej próbki: w strefie tarcia i poza strefą tarcia. Zbadano trzy próbki po pracy w oleju bez dodatku i trzy próbki po pracy w oleju z dodatkiem 0,25% nanocząstek miedzi. W przypadku próbek, które pracowały w oleju bez dodatku, średnia zawartość (udział masowy) miedzi poza ścieżką tarcia wynosiła 0,25%, a na ścieżce tarcia 0,13%, co stanowiło ilości śladowe. Natomiast analogiczne zawartości miedzi w próbkach po pracy w oleju z dodatkiem nanocząstek miedzi wynosiły odpowiednio 0,54 i 6,60%. Zatem miedź z oleju jest przenoszona tylko na ścieżkę tarcia, co dowodzi tribologicznego charakteru tego procesu.

Dowodzą one, że dodatek nanocząstek metali do olejów smarowych spowodował redukcję zużycia próbek z węgla S20S, współpracujących z przeciwpróbkami ze stali C45. Występujące w tych przypadkach – tylko na ścieżkach tarcia – znaczące zawartości pierwiastków nanocząstek (miedzi lub molibdenu) świadczą o tworzeniu się w strefie tarcia warstewek o charakterze przeciwozużyciowym, zbudowanych z tych pierwiastków.

4. WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań dowodzą, że dodatek nanocząstek miedzi do oleju smarowego spowodował:

1. Redukcję oporów tarcia w skojarzeniu stali C45 z węglikiem spiekany S20S średnio o 25%.
2. Zmniejszenie zużycia współpracujących tarciowo próbek średnio o około 50%.

Poprawa właściwości tribologicznych spowodowana jest konstytuowaniem na powierzchniach tarcia trwałych warstewek ochronnych z nanocząstek miedzi, o własnościach zarówno przeciwтарыowych, jak i przeciwwuzyciowych. Warstewki te mogą się tworzyć w efekcie stopniowego rozwoju w skojarzeniu tribologicznym zjawiska Garkunowa. W intensyfikacji tego zjawiska mogą pomóc odpowiednie katalizatory.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Aouadi S.M. et al.: Tribological investigation of adaptive Mo₂N/MoS₂/Ag coatings with high sulfur content. *Surface and Coatings Technology* 2009, Vol.203, p. 1304÷1309.
- [2] Douglas F. et al.: Silver, gold and the corresponding core shell nanoparticles: synthesis and characterization. *Journal of Nanoparticle Research* 2008, Vol. 10, Supplement 1, p. 97÷06.
- [3] Emge E., Karthikeyan S., Rigney D.A.: The effects of sliding velocity and sliding time on nanocrystalline tribolayer development and properties in copper. *Wear* 2009, Vol. 267, Issues 1-4, p. 562÷567.
- [4] Garkunov D. M. : Tribotechnology: Wear and No-wear. 4th ed. MAA Publishing House, Moscow 2001 (in Russian).
- [5] Ginzburg B.M. et al.: Antiwear effect of fullerene C₆₀ additives to lubricating oils. *Russian Journal of Applied Chemistry* 2002, Vol. 75, No. 8, p. 1330÷1335.
- [6] Kang X. et al.: Synthesis and tribological property study of oleic acid-modified copper sulfide nanoparticles. *Wear* 2007, Vol. 265, Issues 1-2, p. 150÷154.
- [7] Kotnarowski A. i inni: Ocena wpływu proszków metali, zawartych w cieczach smarująco – chłodzących, na zużycie narzędzi i opory tarcia podczas procesu skrawania. Sprawozdanie z projektu badawczego nr 7 T08C 038 20. Radom, luty 2004.
- [8] Kotnarowski A.: Examination of Selective Transfer Phenomenon. 3rd International Conference: Mechatronic Systems and Materials (MSM 2007), 27-29 September, 2007, Kaunas, Lithuania. Abstracts of Reviewed Papers, Technologija, Kaunas 2007, p. 177.
- [9] Kotnarowski A.: Examination of Selective Transfer Phenomenon. In: Mechatronic Systems and Materials II. Solid State Phenomena 2009, Vol. 144, p. 279÷284.
- [10] Kotnarowski A.: Searching for Possibilities of Lubricating and Cutting Fluids Modification with Copper Micro- and Nanopowders. *Materials Science* 2006, vol. 12, no. 3, p. 202÷208.
- [11] Kotnarowski A.: Selective Transfer Phenomenon in Copper-Steel Tribological Systems. *Solid State Phenomena* 2009, Volume 147-149, p. 558-563.

-
- [12] Lee K. et al.: Understanding the role of nanoparticles in nano-oil lubrication. *Tribology Letters* 2009, Vol. 35, No. 2, p.127÷131.
- [13] Liu G. et al.: Investigation of the mending effect and mechanism of copper nanoparticles on a tribologically stressed surface. *Tribology Letters* 2004, Vol. 17, No. 4, p. 961÷966
- [14] Martin J.M., Ohmae N. (ed.): *Nanolubricants*. John Wiley and Sons Ltd. 2008, 234 p.
- [15] Muratore C., Hu J.J., Voevodin A.A.: Adaptive nanocomposite coatings with titanium nitride diffusion barrier mask for high-temperature tribological applications. *Thin Solid Films* 2007, Vol. 515, Issues 7-8, p. 3638÷3643.
- [16] Polyakov A. A., Ruzanov F. I.: *Friction on the Basis of Self-organization*. Ed. Nauka, Moscow 1992 (in Russian).
- [17] Tarasov S. et al.: Study of friction reduction by nanocoper additives to motor oil. *Wear* 2002, Vol. 252, Issues 1-2, p. 63÷69.
- [18] Xu T., Zhao J., Xu K.: The ball-bearing effect of diamond nanoparticles as an oil additive. *Journal of Physics D: Applied Physics* 1996, Vol. 29, Issue 11, p. 2932÷2937.
- [19] Zappone B. et al.: Molecular aspects of boundary lubrication by human lubricin: Effect of disulfide bonds and enzymatic digestion. *Langmuir* 2008, Vol. 24, Issue 4, p. 1495÷1508.