

Wojciech ŻUROWSKI¹

PRZENOSZENIE CZĄSTEK W PROCESIE TARCIA SUCHEGO

Z pierwszej zasady termodynamiki można wysnuć wnioski co do warunków zużycia ujemnego, czyli nanoszenia tarcowego. W technice można go zastosować w procesie regenerowania węzłów tarcowych i w ten sposób minimalizować zużywanie. Podstawą w tym przypadku jest zjawisko przenoszenia materiału między powierzchniami tarcia oraz zjawisko nanoszenia tarcowego, występujące w określonych warunkach termodynamicznych. Należy rozważyć kiedy i dlaczego obserwuje się wielokrotne przenoszenie materiału między elementami par tarcowych poprzedzające opuszczenie strefy tarcia przez gotową cząstkę.

TRANSFER OF PARTICLES AT THE DRY FRICTION PROCESS

From the first rule of the thermodynamics one can draw out conclusions regarding conditions of the negative waste, that is to say bringing frictional. In the technique one can try him use in the process of regenerating of frictional hitches and like this minimalize the waste. A base in this instance is the occurrence of the transfer of the material between surfaces of friction and the occurrence of bringing frictional, occurrent under certain conditions thermodynamical. We ought to consider when and why we observe the repeated transfer of the material between units of frictional couples the previous abandonment of the zone of the friction by the ready small part. From the physical point of view, most evidently the realization of the condition of the zero-waste is made difficult during single of contact of the inequality of surfaces spawning bodies. The upraised matter one ought to treat as open and exacting of the urgent decision.

1. WSTĘP

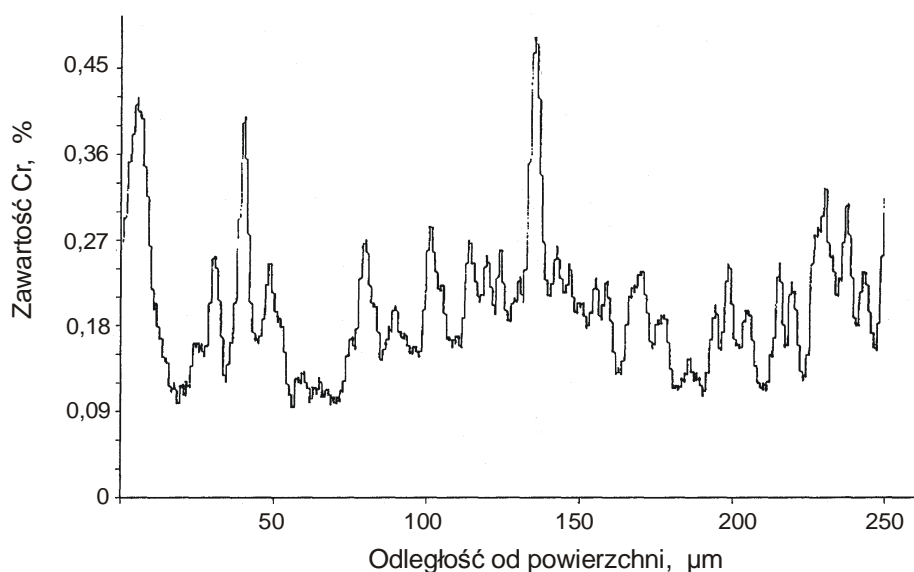
Zasada zużywania utleniającego metali zakłada cykliczne usuwanie warstewek utlenionych w wyniku osiągnięcia przez nie grubości krytycznych odpowiadających aktualnym warunkom tarcia. Występujący wówczas kontakt ciał metalicznych może powodować przenoszenie cząstek zarówno z ciała miększego na twardsze (co odpowiada przenoszeniu adhezyjnemu), jak z twardszego na miększe. Liczne prace dotyczące przenoszenia cząstek podczas tarcia wskazują na taką możliwość.

¹Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Krasickiego 54; e-mail: wzurow@pr.radom.pl

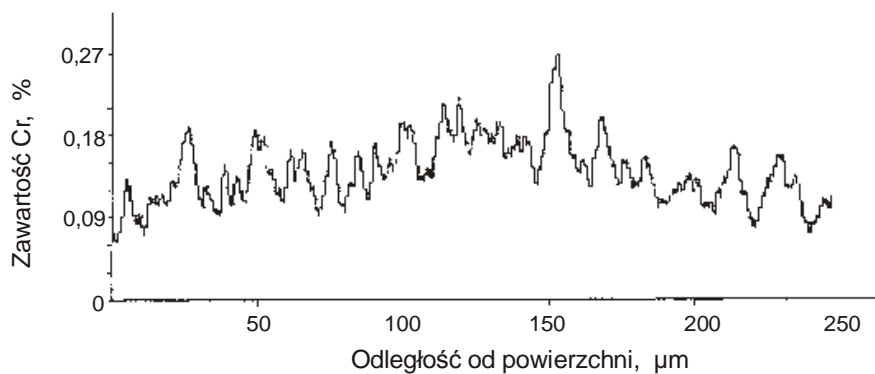
A. K. Pogosjan i współpracownicy [1] podają charakterystykę mechanizmów ciernego przenoszenia i dzieli je na: mechaniczne, adhezyjno-mechaniczne, dyfuzyjne, adhezyjno-energetyczne i fizykochemiczne. Zauważają, że żadna z hipotez nie tłumaczy dokładnie zjawiska powstawania warstw nanoszonych ciernie.

Bardzo szeroką analizę zagadnienia przenoszenia cząstek podczas tarcia przedstawił W. Czupryk w pracach [2, 3]. Według niego żadne ze zjawisk związanych z adhezją, zmęczeniem lub ścieraniem nie wyjaśnia mechanizmu przenoszenia żelaza do warstwy ciała miękkiego w warunkach zużywania utleniającego.

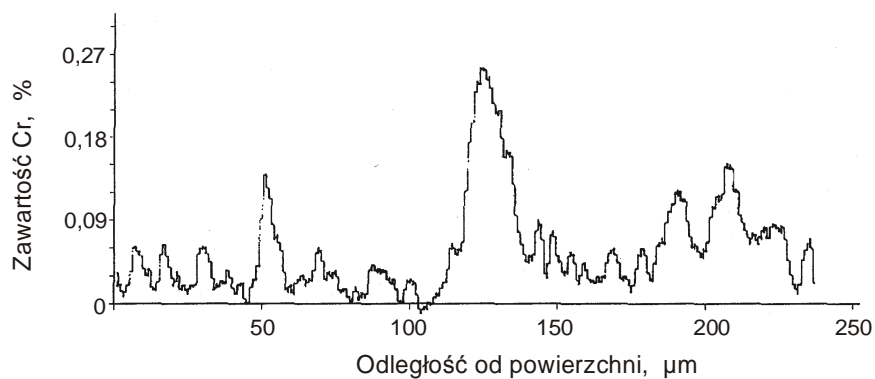
Badania własne autora niniejszej pracy [4, 5] wykonane z wykorzystaniem mikroanalizy rentgenowskiej potwierdziły fakt przenoszenia składników twardego przeciwelementu stalowego (stal NC6, 60 HRC) do warstw wierzchnich stali C45 (rys. 1.), N8E (rys. 2), żelaza ARMCO (rys. 3), stopu LC60 (rys. 4), cynku (rys. 5), miedzi (rys. 6), ołowiu (rys. 7) i glinu (rys. 8). Należy wskazać, że badano materiały po próbach tarciovych w warunkach zwiększonej odporności na ścieranie. Parametry procesu tarcia były w tym eksperymencie ustalone w wyniku badań optymalizacyjnych. Istotnym spostrzeżeniem było, że nanoszenie było związane z próbami uzyskania zwiększonej odporności układu ciernego.



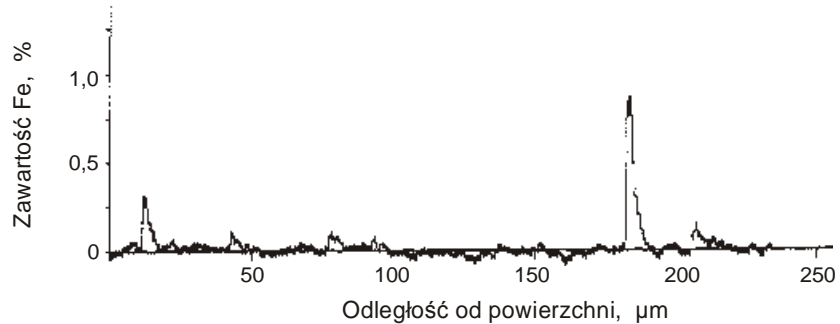
Rys. 1. Wykres zawartości Cr w warstwie wierzchniej ślizgacza ze stali 45 po pracy w warunkach zwiększonej odporności (en. wiązki 15 kV) [5]



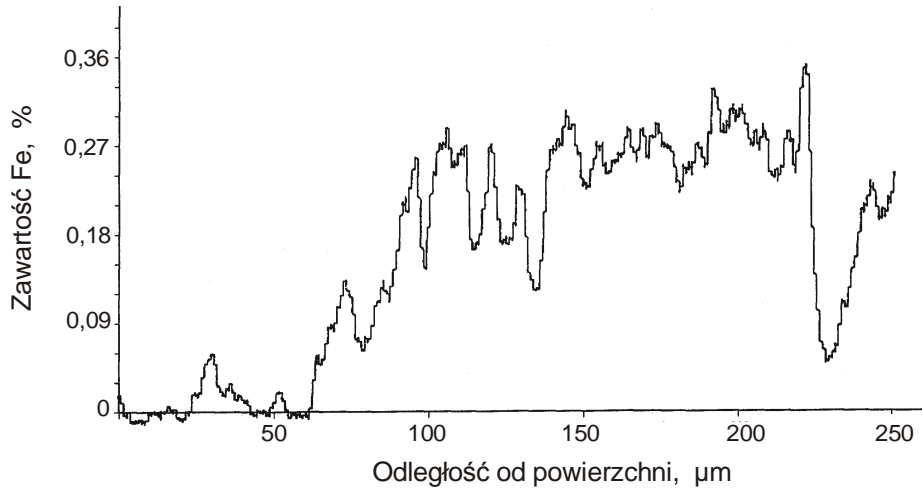
Rys. 2. Wykres zawartości Cr w warstwie wierzchniej ślizgacza ze stali N8E po pracy w warunkach zwiększonej odporności (en. wiązki 15 kV) [5]



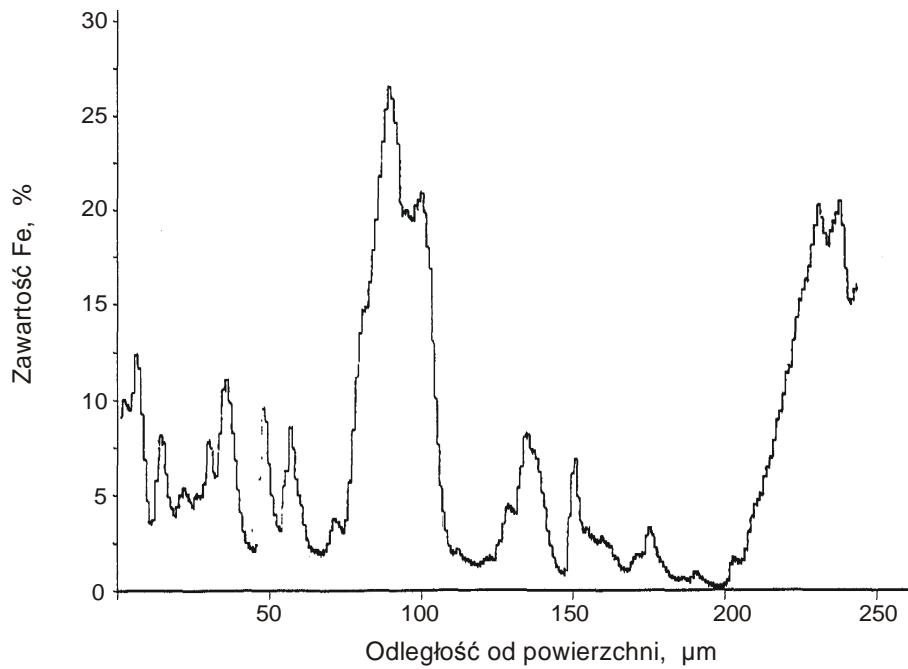
Rys. 3. Wykres zawartości Cr w warstwie wierzchniej ślizgacza z żelaza armco po pracy w warunkach zwiększonej odporności (en. wiązki 15 kV) [5]



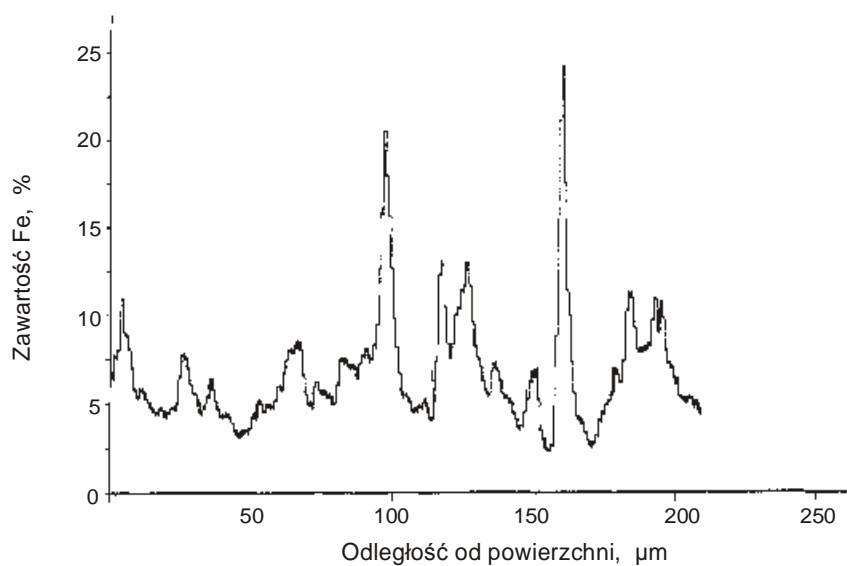
Rys. 4. Wykres zawartości żelaza w warstwie wierzchniej ślizgacza ze stopu LC60 po pracy w warunkach zwiększonej odporności (energia wiązki 15 kV) [5]



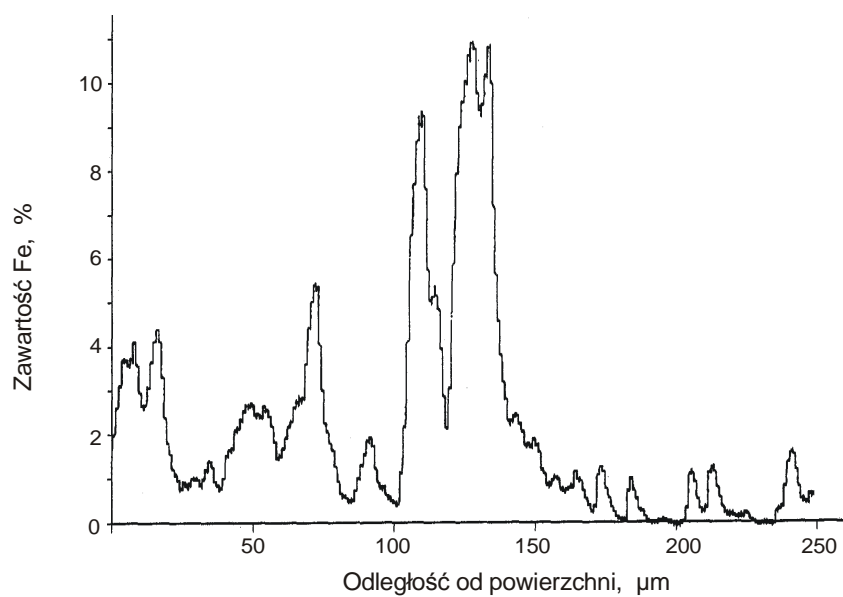
Rys. 5. Wykres zawartości Fe w warstwie wierzchniej ślizgacza z cynku po pracy w warunkach zwiększonej odporności (en. wiązki 15 kV) [5]



Rys. 6. Wykres zawartości Fe w warstwie wierzchniej ślizgacza z miedzi po pracy w warunkach zwiększonej odporności; (en. wiązki 15 kV) [5]



Rys. 7. Wykres zawartości Fe w warstwie wierzchniej ślizgacza z ołowiu po pracy w warunkach zwiększonej odporności; (en. wiązki 15 kV) [5]



Rys. 8. Wykres zawartości Fe w warstwie wierzchniej ślizgacza z glinu po pracy w warunkach zwiększonej odporności (en. wiązki 15 kV) [5]

2. WARUNKI NANOSZENIA TRACIOWEGO

Z pierwszej zasady termodynamiki (1)

$$\Delta U = -\Delta I - Q_{1-2} + A_{t1-2} \quad (1)$$

gdzie: A_{t1-2} pracy tarcia, Q_{1-2} ciepło odprowadzane do otoczenia, ΔI energii odprowadzana wraz z produktami zużycia do otoczenia, ΔU - zmiana energii wewnętrznej systemu.

można wysnuć wnioski co do warunków zużycia ujemnego, czyli nanoszenia tarcioowego. Zjawisko to jest powszechnie znane w różnych dziedzinach życia – pisanie ołówkiem na papierze, to przykład nanoszenia tarcioowego. W technice można go próbować zastosować w procesie regenerowania węzłów tarcioowych i w ten sposób minimalizować zużywanie. Zużycie ujemne według zależności (2)

$$\Delta m = \frac{-\Delta U - Q_{1-2} + A_{t1-2}}{i} \quad (2)$$

zachodzi, gdy spełniona jest nierówność:

$$A_{t1-2} < \Delta U + Q_{1-2}. \quad (3)$$

Zasada nanoszenia tarcioowego głosi, że nanoszenie tarcioowe zachodzi, jeżeli praca tarcia jest mniejsza od sumy energii odprowadzonej do otoczenia na sposób ciepła i przyrostu energii wewnętrznej systemu.

W przypadku procesów stacjonarnych, na podstawie wzoru (4):

$$\dot{m} = \frac{-\dot{Q} + \dot{Q}_{dyss} + \dot{A}_{dyss}}{(u_c + a_{dyss})} \dot{A}_{dyss} = \frac{-\dot{Q} + \dot{Q}_{dyss} + \dot{A}_{dyss}}{i_{st}} \quad (4)$$

gdzie: \dot{A} - strumień pracy, \dot{A}_{dyss} - moc dyssypacji mechanicznej, \dot{Q}_{dyss} - strumień ciepła dyssypacji, \dot{Q} - strumień ciepła, $i_{st} = (u_c + a_{dyss})$ - oznacza entalpię właściwą produktów zużycia ustabilizowanego.

otrzymuje się nierówność:

$$\dot{A} = \dot{A}_{dyss} + \dot{Q}_{dyss} < \dot{Q}, \quad (5)$$

a na podstawie (6):

$$\dot{m} = \frac{-\dot{Q} + \dot{A}}{i_{st}} = \frac{-\dot{Q} + \mu \cdot N \cdot v}{i_{st}} \quad (6)$$

nierówność:

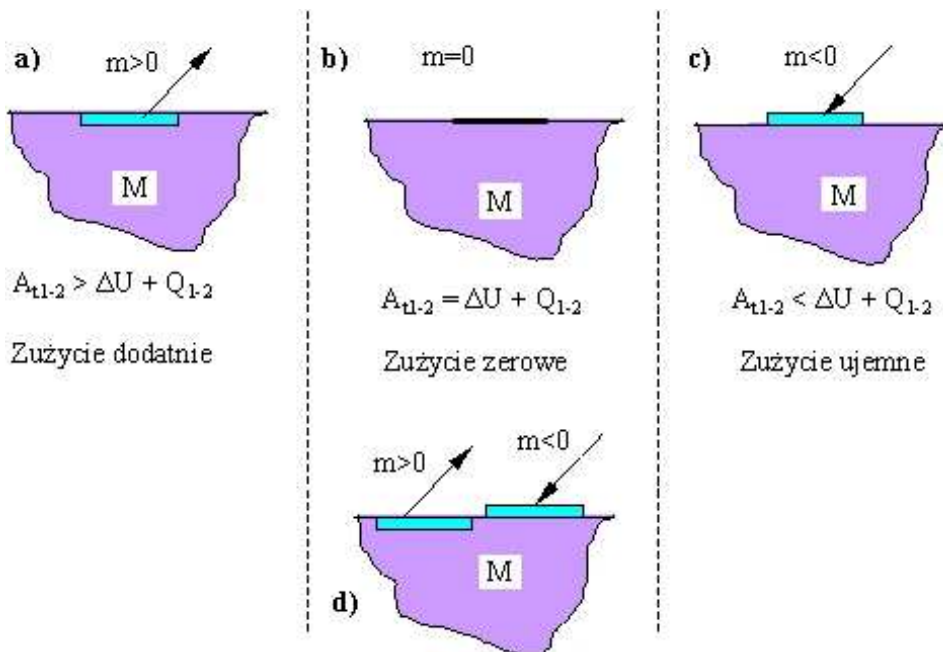
$$\mu \cdot N \cdot v < \dot{Q} \quad (7)$$

gdzie: μ - współczynnik tarcia, N - nacisk, v - prędkość poślizgu.

Z powyższego wynika konieczność bardzo intensywnego chłodzenia systemu, w celu wywołania nanoszenia tarcowego. Jeżeli zachodzą procesy niestacjonarne, to istotną staje się tutaj zmiana energii wewnętrznej, wspierająca wymianę ciepła z otoczeniem. Proces nanoszenia może mieć znaczenie pozytywne, gdy jest odpowiednio prowadzony. Jeżeli charakteryzuje się zbyt dużą intensywnością, to przejawia się jako zacieranie.

Nanoszenie tarcowe, czyli zużycie ujemne ($\Delta m < 0$), jest jednym z trzech podstawowych wariantów wymiany masy systemu z otoczeniem. Pierwszy omówiony z nich, to zużycie dodatnie ($\Delta m > 0$), drugi – zużycie zerowe ($\Delta m = 0$). Należy podkreślić, że w przypadku zużycia zerowego występuje albo system termodynamiczny zamknięty, albo otwarty. Poniżej zostanie przybliżona ta kwestia, gdyż jest ważna dla zwiększania trwałości maszyn i ewentualnie ich regeneracji w trakcie pracy.

Schemat według rysunku 9 uwzględnia cztery warianty przemieszczania się masy między systemem i jego otoczeniem.



Rys. 9. Zasadnicze warianty wymiany masy między systemem tribologicznym i otoczeniem

Pierwsze trzy przypadki wymiany masy a), b) i c) zostały już omówione. Jako system przyjęto część przestrzeni ograniczoną do zaciemnionego obszaru o masie M . Interesujący jest przypadek d) zużycia zerowego. Mimo, że masa systemu nie zmienia się, jest on otwarty, gdyż wymiana masy następuje. Można tę sytuację potraktować jako wypadkową sytuacji według schematów a) i c). Jak wynika z obserwacji procesu tworzenia się cząstki zużycia, zazwyczaj oddzielona cząstka z jednej powierzchni przenosi się na drugą powierzchnię tarcia, gdzie po pewnym czasie powraca na powierzchnie ciała, z którego została oddzielona. Zanim opuści ona strefę tarcia, wielokrotnie powtarza się proces jej przenoszenia i równocześnie następuje grupowanie się pierwotnych cząstek w agregat o stosunkowo dużych wymiarach. Zdaniem niektórych badaczy „gotowa” cząstka składa się z około 125 cząstek pierwotnych [6]. Zjawisko łączenia się wzajemnego cząstek przed opuszczeniem styku tarciovego jest znane i było przedmiotem licznych prac. W Polsce temu problemowi poświęcił dużo uwagi W. Czupryk [5]. Według tego autora, wielkość cząstek przenoszonych w procesie tarcia jest zwykle nie większa od 35÷40 nm. Przeciętna średnica cząstek zużycia ma wartość $\sim 3 \mu\text{m}$. Zjawisko agregacji cząstek utrudnia obserwację ich powstawania.

Dla przypadku przedstawionego na rysunku 9d następuje zdwojenie wydatku energii w odniesieniu do prostego zużycia zerowego b):

$$2A_{1-2} = 2 \cdot (\Delta U + Q_{1-2}). \quad (8)$$

Skoro realizacja wariantu d) wymaga podwojonego nakładu energii w stosunku do wariantu b), to należy rozważyć kiedy i dlaczego obserwuje się wielokrotne przenoszenie materiału między elementami par tarciovych poprzedzające opuszczenie strefy tarcia przez gotową cząstkę. Z fizycznego punktu widzenia, najwidoczniej realizacja warunku mówiącego, że o ilości powstających produktów zużycia informuje nie tylko praca (moc) ich tworzenia, lecz również efekty cieplne związane z nagrzewaniem tarciovym systemu, z jego chłodzeniem oraz z nagrzewaniem się samych produktów zużycia jest utrudniona podczas pojedynczego zetknięcia się nierówności powierzchni trących się ciał. Podniesioną kwestię na tym etapie analizy traktuje się jako otwartą i wymagającą rozstrzygnięcia.

Warunek nanoszenia tarciovego (5) i jego szczególne postacie (6), (7), ukazuje sposób postępowania technicznego, który nawiązując do wariantu d) (rys. 9), skutkuje naniesieniem warstewki materiału. Skoro istotna rola przypada w tym procesie cząstkom o małych wymiarach (w odniesieniu do „gotowych” cząstek zużycia), to ich obecność w strefie tarcia należy zapewnić np. przez wprowadzenie substancji o odpowiednim składzie i budowie. Hipotetycznie można by to uczynić za pomocą specjalnego smaru. Jednak, biorąc pod uwagę, że cząstki produktów ścierania już znajdują się w systemie, to utrzymywanie tych produktów, w sposób kontrolowany, w styku tarciovym może przynieść podobny efekt. Ponadto należy zapewnić wystarczająco intensywne i kontrolowane chłodzenie systemu, zwłaszcza w strefie tarcia.

W odniesieniu do tarcia suchego zjawisko nanoszenia tarciovego łączone było głównie z nanoszeniem adhezyjnym i nie zwracano uwagi lub niezauważano korzyści jakie może przynieść kontrolowane wywoływanie tego zjawiska. Dla tarcia płynnego lub mieszanego takie spostrzeżenia zostały poczynione w wielu publikacjach. Przykładowo w pracy [7] zwrócono uwagę na tworzenie powłok na elementach maszyn ze stali i żeliwa dzięki zastosowaniu odpowiednich (zawierających np. związki miedzi i cynku) cieczy

smarujących podczas obróbki skrawaniem. W trakcie skrawania metale te tworzą powłokę na powierzchni obrabianego elementu zwiększając jego odporność na zużycie oraz przynosząc inne, już nie tribologiczne efekty.

A. Kotnarowski w pracy [8] zajął się wytwarzaniem warstw ochronnych na współpracujących częściach maszyn z wykorzystaniem nanoproszków. Powołując się na prace m.in. R. Marczaaka przywołuje znane w literaturze przedmiotu tzw. zjawisko Garkunowa polegające na pobieraniu atomu miedzi ze źródła (np. cieczy smarującej) i doprowadzeniu tych atomów do powierzchni roboczych par trących, na których mogą się one wydzielać. W wyniku zachodzenia na powierzchniach tarcia przemian chemicznych można uzyskać ewolucyjne zmiany grubości warstwy rozdzielającej współpracujące powierzchnie pary trącej. W efekcie, na zasadzie tzw. przenoszenia selektywnego, można osiągnąć znaczące zwiększeni trwałości danego układu ciernego.

Liu [9] podaje że jednym z mechanizmów wpływania przez nanocząstki metali na przebieg procesów tribologicznych jest ich wtórne oddziaływanie na powierzchnie tarcia. Polegać może ono na kompensowaniu przez nanocząstki ubytków masy współpracujących elementów, spowodowanych m.in. mikrouszkodzeniami adhezyjnymi.

3. WNIOSKI

W przypadku tarcia suchego nie dostarczamy do styku tarciovego żadnych dodatkowych składników (cząstek, atomów), lecz wykorzystujemy cząstki już znajdujące się w systemie (produkty ścierania). Nanoszenie tarciove w tych warunkach musi być wywołwane poprzez odpowiednie ustabilizowanie parametrów termodynamicznych układu. Takiemu procesowi sprzyja manometryczna wielkość cząstek zużycia – tlenków i materiału rodzimego (ferrytu i martenzytu).

Z przeprowadzonej analizy stanu wiedzy o zużyciu w systemach tribologicznych można wskazać dwa podstawowe zagadnienia: sformułowanie bilansu energii dla sytemu tribologicznego i zdefiniowanie zużycia tribologicznego.

Próby dokładniejszego zanalizowania bilansu energetycznego dla procesu tarcia zintensyfikowały się w połowie dwudziestego wieku. Proponowane bilanse energii systemów tribologicznych zawierają od dwóch do kilkunastu składowych. Od końca ubiegłego wieku liczba prac opisujących energetykę tarcia rośnie. Wprowadzane są nowe pojęcia, jak współczynnik ciepła szczątkowego, czy zdolność rozpraszania ciepła. Postrzega się entropię jako miarę uniwersalną, która może być używana do właściwego scharakteryzowania zasięgu zakłócenia systemu tribologicznego przy którym proces zużycia może się rozwijać. Uznaje się, że drugie prawo termodynamiki może być wykorzystane do przewidywania uszkodzeń, w oparciu o poziom produkcji i akumulacji entropii. Rzeczywiście, entropia w rozważaniach teoretycznych wydaje się być bardzo dobrym wskaźnikiem, ale w warunkach technicznych takiej roli nie pełni, z uwagi na trudności w ustaleniu, między innymi równań kinetycznych stanu systemu, co jest obecnie nieosiągalne bez odwołania się do fizyki statystycznej.

W bardzo niewielu pracach podjęto problem zwiększania odporności na zużycie. Rozważania nad czynnikami intensyfikującymi zużycie raczej dążą do opracowania metod przyspieszonego badania procesów zużycia, niż jego ograniczaniu. W opisywanych eksperymentach nie badano wpływu temperatury na strukturę bilansu energetycznego w procesie tarcia.

W pracach poświęconych procesom nanoszenia tarcowego główną uwagę zwraca się na tarcie płynne i rolę dodatków smarnych zdolnych do wytwarzania warstw ochronnych na współpracujących elementach. Tylko pojedyncze prace podejmują ten temat w odniesieniu do tarcia suchego. W najnowszych publikacjach podkreśla się przydatność stosowania nanocząstek metali do zwiększania odporności na zużycie tribologiczne elementów maszyn lub zwiększania wydajności obróbki skrawaniem, lecz jak wspomniano, w warunkach tarcia płynnego lub mieszanego.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Pogosjan A.K., Oganiesjan K.V.: Javlenie frikcionnogo perenosa i osnovnyje zakonomernosti i metod issledovanija. *Trenie i iznos*. 1986, t.7, nr 6.
- [2] Czupryk W.: Frictional transfer of iron in oxidative wear conditions during lubricated sliding. *Wear* 237 (2000) 288–294.
- [3] Czupryk W.: Wpływ zjawisk wtórnych na zużywanie utleniające metali w procesie tarcia poślizgowego. *Prace Naukowe nr 848 Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej we Wrocławiu, Wrocław 2000.
- [4] Żurowski W.: Energetyczny aspekt wzrostu odporności metali na zużywanie w procesie tarcia technicznie suchego. *Rozprawa doktorska*. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1996.
- [5] Żurowski W.: Badanie przenoszenia metali w procesie tarcia suchego. *Materiały XXIV Jesiennej Szkoły Tribologicznej*. Polska Tribologia 2000 – Teoria i praktyka. Radom 2000.
- [6] Kragelski I.V., Dobyčın M.N., Kombalov V.S.: *Osnovy rasčetov na trenie i iznos*. Moskva, Mašinostroenie 1977.
- [7] Pytko S., Marzec S.: *Tribologia procesów skrawania metali*. Biblioteka problemów eksploatacji. ITE, Radom, 1999.
- [8] Kotnarowski A.: *Konstytuowanie warstwa ochronnych z nanoproszków miedzi i molibdenu w procesach tribologicznych*. Monografia nr 136. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej. Radom 2009.
- [9] Liu G., Li X., Qin B., Xing, D., Guo Y. and Fan R.: Investigation of the men-ding effect and mechanism of copper nano-particles on a tribologically stressed surface. *Tribology Letters* 2004, Vol. 17, No. 4, 961 ÷ 966.