

PROBLEMY NIEKONWENCJONALNYCH UKŁADÓW ŁOŻYSKOWYCH

Łódź 09-10 maja 1995 roku

Jan Guzik, Ryszard Marczak
(Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn WSI Radom)

ISTOTA, MODEL I MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA ZJAWISKA GARKUNOWA W TECHNICIE

SŁOWA KLUCZOWE

bezzużyciowe tarcie, chemisorpcja, eksploatacyjna warstwa wierzchnia, zjawisko Garkunowa

STRESZCZENIE

Opisano zjawisko Garkunowa. Rozrózniono procesy tworzenia warstw niskotarciowych i ich funkcjonowania. Omówiono przemianę technologicznej warstwy wierzchniej (*TWYM* w eksploatacyjną warstwę wierzchnią (*EWGV*) zawierającą związki chemisorbowane. Wykazano wpływ dodatków oraz docierania wężła tarcia na trwałość *EWV*. Zaproponowano zweryfikowany model zjawiska Garkunowa oraz przedstawiono możliwości praktycznego wykorzystania tego zjawiska.

WSTĘP

Potrzebę zajęcia się problematyką badawczą określaną pojęciem, zjawisko bezzużyciowego tarcia, przedstawiono w referacie wygłoszonym na otwartym zebraniu naukowym Komitetu Budowy Maszyn PAN (Borków koło Kielc 1991.10.03). Zyskał on bardzo życzliwe poparcie uczestników zebrania i w konsekwencji przyznanie grantu na ten temat. Niniejsza praca wykorzystuje część wyników uzyskanych podczas realizacji tego projektu

WPROWADZENIE

W latach pięćdziesiątych D.N. Garkunow zauważył, że elementy trące kompresorów chłodziarek zużywają się w anomalnie niskim stopniu. Analiza mechanizmu zjawiska przeprowadzona wraz z J. W. Kragielskim wykazała, że atomy miedzi z przewodów kompresora zostają przeniesione na robocze powierzchnie par kinematycznych, na których powstaje cienka warstwa o szczególnych własnościach. Podobną, niskotarciową warstwę uzyskali ci uczeni dla pary trącej stal - stopy miedzi smarowanej gliceryną [1]. Proces ten jest nazywany zjawiskiem Garkunowa, selektywnego przenoszenia (SP), bezzużyciowego tarcia (BT).

Ta ostatnia nazwa wynika z faktu, iż w niektórych przypadkach intensywność zużywania może się zmniejszyć nawet 1000 razy [2, 3]. W dalszej części pracy przyjęto fenomenologiczną definicję tego zjawiska. Występuje ono z dużym prawdopodobieństwem wtedy, gdy w parze trącej nie występuje w danych warunkach tarcie płynne, a pomimo to wartość współczynnika tarcia

jest porównywalna z wartością współczynnika tarcia płynnego i jednocześnie intensywność zużycia zmniejsza się o 2 - 3 rzędy.

W literaturze przedmiotu były przedstawione wyniki wielu eksperymentów, jednakże nie zostały opublikowane prace podstawowe, które by wyjaśniały naturę zjawiska bezzużyciowego tarcia. Obserwowane w świecie intensywne badania ukierunkowane są głównie na nowe technologie, materiały i sposoby optymalnego ich zastosowania w celu zmniejszenia tarcia i zużycia w kinematycznych węzłach maszyn. Najczęściej są to środki smarowe obniżające tarcie i zużycie węzłów trących maszyn, samochodów, maszyn roboczych, itp. Materiały te są chętnie nabywane przez użytkowników, mimo iż zasada ich działania nie jest znana (obecnie na polskim rynku jest kilkadziesiąt rodzajów tych środków). Wynika stąd potrzeba prowadzenia badań w celu bliższego poznania natury zjawiska Garkunowa.

W pracy przyjęto model opisujący proces przedstawiony przez A. A. Poljakowa [4]. Jego zdaniem podstawowym warunkiem wystąpienia SP jest lokalizacja procesu tarcia w cienkiej warstewce metalicznej, zdolnej do dyssypacji energii i materii. W ujęciu termodynamicznym układ, w którym zachodzi SP, odnoszony do rozpatrywanej warstwy powierzchniowej i otoczenia, jest układem otwartym; między elementami układu może zachodzić wymiana ciepła i materii, co zapobiega gromadzeniu się entropii strukturalnej prowadzącej, jak wiadomo, do zniszczenia warstewki. Swoista reguła przekory zapewnia funkcjonowanie systemu poprzez utrzymywanie równowagi pomiędzy ilością wakansów a ilością dyslokacji, stanem układu a wymuszeniami.

Najbardziej aktywne atomy na powierzchni wchodzą w reakcje z cząsteczkami aktywnego środowiska tworząc związki kompleksowe. W zależności od ich budowy molekularnej mogą one układać się warstwowo tworząc w ten sposób płaszczyzny poślizgu. W obszarach mniej obciążonych uwalniane są jony metalu, które dzięki zjawisku elektroforezy mogą ponownie wbudować się w warstewkę. Zdaniem A. A. Poljakowa selektywna zdolność ligand zawartych w substancji smarującej do tworzenia wiązań z atomami na powierzchni tarcia odgrywa zasadniczą rolę w równowadze procesu tarcia i stwarza konieczność starannego doboru środka smarowego do materiałów pary trącej. Tworzące się na powierzchni metalu związki kompleksowe powinny także chronić go przed utlenieniem.

Badania eksperymentalne W.F.Piczugina [5] potwierdziły ogólną prawidłowość modelu Poljakowa. Między innymi Piczugin stwierdził, że im mniejsza liczba dodatków stopowych (w badanym stopie), tym niższa wartość współczynnika tarcia i intensywność zużycia. Na podstawie kompleksowych badań rentgenowskich, spektroskopii Augera i ESCA warstwy wierzchniej próbek po pracy w warunkach SP zaproponował on własny schemat budowy warstw wierzchnich pary stop miedzi - stal oraz model wzajemnego oddziaływania elementów układu tribologicznego.

Z dotychczasowych prac z zakresu oddziaływania aktywnego środowiska na warstwę wierzchnią metali wynikało, że wszystkie procesy tribologiczne można rozpatrywać jako efekt łącznego oddziaływania bodźców mechanicznych (jako skutków tarcia) i aktywnego środowiska. Można zatem do ich tłumaczenia w skali makroskopowej znaleźć dobre wytłumaczenie na gruncie termodynamiki. Termodynamika umożliwia łączne rozpatrywanie skutków transformacji energii doprowadzonej do układu z zewnątrz, energii chemicznej wydzielanej w obszarze tarcia i energii powierzchni. Do interpretacji zachodzących w obszarze tarcia przemian można wykorzystać termodynamiczną regułę przekory, brzmiącą: *'jeśli układ znajdujący się w stanie równowagi zostanie poddany jakiemuś nowemu działaniu z zewnątrz - to w układzie zajdą takie przemiany, które działanie tego bodźca zmniejsza prowadząc do nowego stanu równowagi, możliwie niezbyt odległego od stanu wyjściowego'*.

Stwierdzenie, że można w sposób ilościowy opisać efekty fizykochemicznego oddziaływania środowiska na mechaniczne właściwości ciał stałych (przy wykorzystaniu formalnego aparatu termodynamiki) otwiera możliwość wykorzystania w tribologii dorobku P. A. Rebinder'a i jego szkoły. W sposób najprostszy można ten mechanizm przedstawić następująco:

jeżeli w chwili powstawania nowego elementu powierzchni ciała (*in statu nascendi*) nie zdąży nastąpić akt adsorpcji atomu lub cząsteczki z otaczającego środowiska - to obniżenie energii powierzchniowej przejawia się ułatwieniem przemieszczenia ujęć dyslokacji na powierzchnię kryształu i w konsekwencji - ułatwieniem plastycznego płynięcia w warstwie wierzchniej. Należy przypuszczać, że ten ostatni mechanizm związany jest z przebiegiem procesów chemisorpcyjnych, wtórnych w stosunku do procesów adsorpcyjnych.

Procesy fizykochemiczne zachodzące na granicy faz warstwa wierzchnia - środek smarny, determinują przebieg procesu tarcia i charakter występującego zużycia.

W prowadzonych badaniach przyjęto zasadę rozróżniania (występujących najczęściej łącznie) dwóch procesów: tworzenia się warstw (pokryć) niskotarciowych i ich funkcjonowania. Miało to na celu wykrywanie przyczyn ewentualnego niewystąpienia zjawiska bezzużyciowego tarcia i lepsze uporządkowanie faktów doświadczalnych. Uznano także, że należy szczegółowo zbadać warunki, w jakich to zjawisko występuje (materiały węzła tarcia, środki smarowe, wymuszenia w maszynach tribologicznych). Do badań materiałowych postanowiono wykorzystać możliwości badawcze i aparaturowe wybranych jednostek naukowo-badawczych w kraju.

BADANIA EKSPLOATACYJNEJ WARSTWY WIERZCHNIEJ (*EWW*) W MASZYNACH TARCIOWYCH

Podstawowe wymuszenia tribologiczne to: nacisk jednostkowy, prędkość ślizgania i temperatura.

Poszczególne rodzaje oddziaływań są ze sobą ściśle związane, co utrudnia jednoznaczne przypisanie skutków jednemu z nich. Mimo, że publikuje się dużo szczegółowych wyników badań, to nie dają one obrazu całości. Próby uogólnienia prowadzą się często do stwierdzenia, że właściwości tribologiczne węzłów tarcia zależą od wszystkich zjawisk zachodzących w obszarach tarcia.

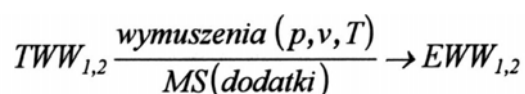
Przyjęto hipotezę, że współczynnik tarcia i intensywność zużycia są odpowiedziami systemu tribologicznego na wymuszenia w skali *makro*. Odpowiedzią systemu w skali *mikro* jest zmiana składu chemicznego warstwy wierzchniej.

Eksploatacyjna warstwa wierzchnia powstaje w wyniku procesu docierania. Jest to proces złożony, można jednak w nim wyróżnić dwa prostsze procesy zachodzące jednocześnie, wzajemnie oddziałujące i nakładające się. Są to proces: wzajemnego dopasowywania się współpracujących powierzchni poprzez odkształcenia plastyczne i ścieranie, oraz powstawania na powierzchni roboczej ciał trących warstwy tlenków lub innych związków metali oraz monomolekularnej warstwy związków chemisorbowanych.

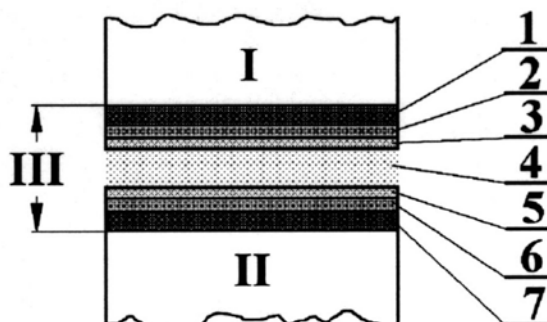
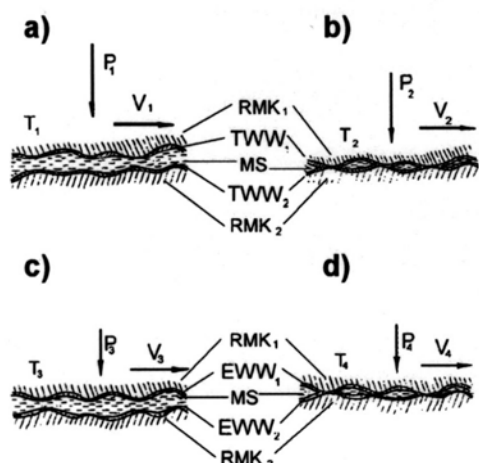
Wyróżnia się cztery modelowe przypadki różniące się rodzajem tarcia lub budową warstwy wierzchniej współpracujących części (rys. 1).

Rozróżniono technologiczną warstwę wierzchnią wytworzoną w procesie produkcji (*TWW*), oraz eksploatacyjną warstwę wierzchnią (*EWW*) przekształconą w procesie tarcia. Model pary trącej z wytworzoną *EWW* można przedstawić tak, jak jest to na rysunku 2.

Przemiana technologicznej warstwy wierzchniej w eksploatacyjną warstwę wierzchnią zachodzi w strefie tarcia pod wpływem wymuszeń, przy udziale aktywnych składników materiału smarowego:



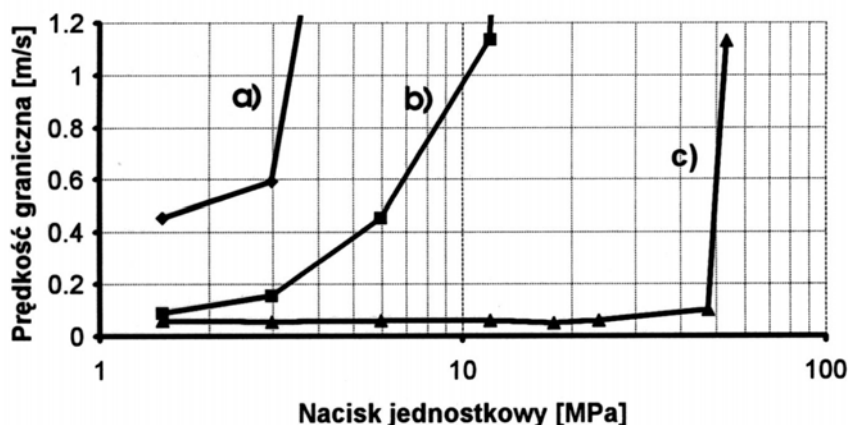
Istotą przemiany jest trwałe łączenie się związków organicznych z metalem (bezpośrednio lub na przykład przez tlenki).



Rys. 1. Współpracujące elementy sytemu tribologicznego (ST):
 a, b) na początku współpracy,
 c, d) podczas normalnej eksploatacji; a, c)
 tarcie płynne,
 b, d) tarcie mieszane

Rys. 2. Makroskopowy model pary trącej I, II -
 materiały konstrukcyjne,
 III - "ciało" pośredniczące:
 1, 7 - strefa związków chemicznych (np.
 tlenków), 2, 6 - monomolekularna strefa
 związków chemisorbowanych,
 3, 5 - wielomolekularna strefa sorbowana
 fizycznie, 4 - strefa dynamiczna (olej)

Zwiększenie nacisku jednostkowego jak gdyby *ściska EWW*, przybliża do siebie elementy metalowe I i II, a po przekroczeniu granicznej wartości nacisku powoduje *przebicie* wszystkich stref i styk metaliczny (rys. 3).



Rys.. 3. Porównanie granic rodzajów tarcia dla modelowego ST MT-1 z olejem smarowym (a - bazowym, b, c - z dodatkami): b) bez docierania, c) po 24 h docierania ($p=24$ MPa, $X_0,38$ m/s)

Powstające eksploatacyjne warstwy wierzchnie decydują o tribologicznych właściwościach węzła tarcia podczas normalnej eksploatacji, stąd duża rola badań tribologicznych.

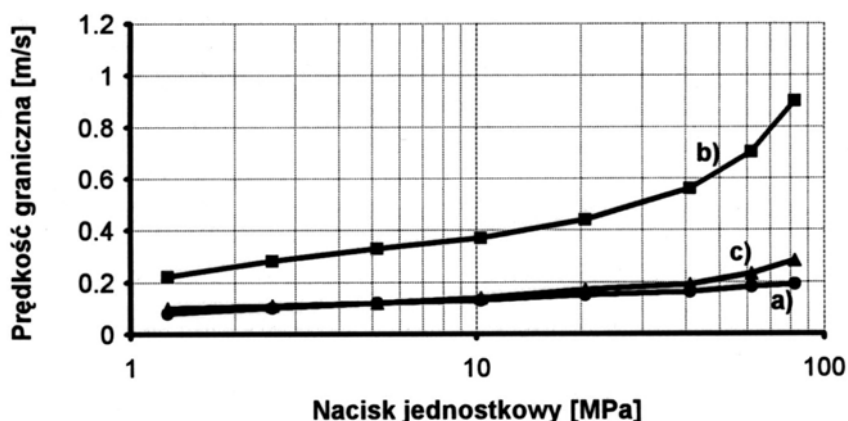
Powyższe rozważania mają charakter ogólny i dotyczą wszystkich systemów tribologicznych. Warstewka niskotarciowa jest szczególnym przypadkiem EWW. Umożliwia to porównywanie tribologicznych systemów z warstewkami niskotarciowymi oraz systemów, w których EWW nie wykazuje właściwości niskotarciowych.

Pomiar wartości rezystancji elektrycznej w węzłach tarcia był wykorzystywany do identyfikacji tarcia mieszanego w danym węźle. Nowością w opracowanej metodzie jest jednoczesne

uwzględnianie wpływu nacisku jednostkowego oraz prędkości ślizgania na granicę występowania tarcia mieszanego. Uzyskano w ten sposób nowe narzędzie porównywania systemów tribologicznych [6, 7].

Każda krzywa jest zbiorem punktów odpowiadających stałej, umownie wysokiej wartości rezystancji elektrycznej. Badania rozpoczyna się przy małej prędkości ślizgania; dla zadanego nacisku jednostkowego dokonuje się pomiaru rezystancji elektrycznej, po czym zwiększa się nacisk aż do momentu, w którym nastąpi *przebiecie* warstwy granicznej (dielektryka). Powrót do pierwotnej (wyjściowej) wartości rezystancji wymaga zwiększenia prędkości ślizgania (wzrostu udziału tarcia płynnego).

Na rysunku 4 pokazano granice rodzajów tarcia układu: para trąca maszyny MT-1 z 0,5% roztworem dodatków niskotarciowych w oleju bazowym.



Rys. 4. Granice rodzajów tarcia wyznaczone w węźle MT-1 smarowanym olejem bazowym dla *EWW* wytworzonej na krążku docieranym w węźle maszyny Amslera (8 h, $p = 6$ MPa, $v = 0,42$ m/s) z roztworami dodatków niskotarciowych: a) Greterin 3, b) MKF-18, c) Syntorg Cu 1

Jak widać z przebiegu krzywych a) i c) została wytworzona bardzo wytrzymała *EWW*. Badania układów uprzednio dotartych w maszynie Amslera prowadzono w kąpeli oleju bazowego. Potwierdza to spostrzeżenie, że granica rodzajów tarcia zależy od budowy eksploatacyjnej warstwy wierzchniej. *EWW* cechuje pewna trwałość (np. odporność na rozpuszczalniki niepolarne) dzięki czemu można przenosić próbki do innej maszyny tarciowej. Można też "przenieść" *EWW* razem z metalem (na którego powierzchni została wytworzona dana warstwa) np. do spektrofotometru w celu otrzymania odbiciowego widma w podczerwieni (IR-ATR).

Przedstawione wyniki dowodzą, że:

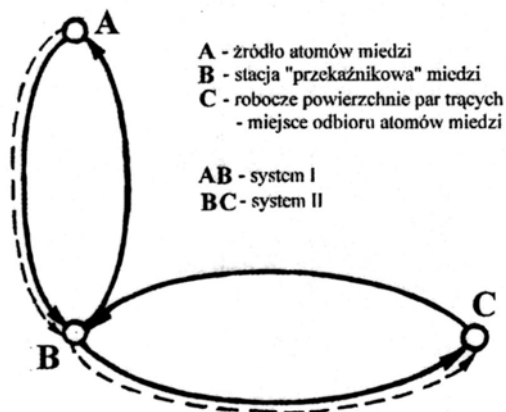
- dodatki smarnościowe (przeciwzużyciowe oraz przeciwwzatarciowe) powodują przesunięcie granicy rodzajów tarcia w stronę większych wartości nacisków jednostkowych i mniejszych wartości prędkości w porównaniu z olejem bazowym nie zawierającym aktywnych substancji. Fakt ten należy tłumaczyć szybko zachodzącą chemisorpcją lub reakcją chemiczną aktywnych składników oleju (dodatków) z atomami na powierzchni metalu,
- docieranie węzła tarcia z olejem zawierającym aktywne składniki powoduje dalsze przesunięcie granicy rodzajów tarcia w stronę większych wartości nacisku jednostkowego (w przykładzie wg rys. 3 od 12 MPa do około 50 MPa) oraz ostre załamanie linii granicznej. Świadczy to o wykorzystaniu potencjalnych możliwości danego zestawu aktywnych składników do trwałego wiązania się z powierzchnią metalu. Podczas docierania usuwane są z powierzchni związki słabiej związane, a ich miejsce na powierzchni zajmują związki organiczne łączące się silniejszymi wiązaniami.

- przy pomocy dodatków niskotarciowych można wytworzyć EWW bardzo odporną na zniszczenie; wytworzona warstwa wierzchnia (rys. 4., linie a i c) nie została zniszczona przez największe, stosowane podczas badania, wartości nacisków jednostkowych.

ZWERYFIKOWANY MODEL ZJAWISKA GARKUNOWA

Odkrycie D. N. Garkunowa dotyczyło w swej istocie wpływu miedzi w postaci elementu (ów) maszyny na zwiększenie trwałości jej kinematycznych węzłów i tym samym na zwiększenie trwałości maszyny.

W świetle przeprowadzonych badań określanie tą nazwą zjawiska zjawiska bezzużyciowego tarcia nie jest uzasadnione. Mechanizm zjawiska Garkunowa polega na pobieraniu atomów miedzi ze źródła *A* (patrz rys. 5) i dostarczeniu ich do oleju smarowego (*B*) przez system I (krążącego freonu). System II (krążącego oleju) doprowadza te atomy do roboczych powierzchni par trących (*C*), na których mogą wydzielać się. Można domniemywać, że w środowisku niewodnym, tj. w olejach, postać w jakiej odbywa się transport miedzi - to prawdopodobnie jej związki organiczne (kompleksowe).



Rys. 5. Model zjawiska Garkunowa

Zjawisko Garkunowa można zaliczyć do samoorganizujących się procesów przyrody nieożywionej, które zachodzi w systemie tribologicznym termodynamicznie otwartym.

Wytworzona warstewka miedzi posiada strukturę, w której ponad dziesięć procent węzłów sieci nie jest zajęte przez atomy. Z tego względu można ją traktować jako quasi cieciz występującą tylko podczas tarcia. Tarcie nie może jej zniszczyć, ponieważ ją odtwarza (reprodukuje). Pokrywający nierówności powierzchni tarcia elementów stalowych układ: warstewka miedzi - chemisorbowana warstewka kompleksu metaloorganicznego, przenosi całe obciążenie. W tych warunkach miękki materiał współpracuje z miękkim, obciążenie rozkłada się równomiernie na całej powierzchni tarcia, dzięki czemu nacisk jednostkowy jest niewielki.

Na powierzchni tarcia zachodzą rozliczne przemiany chemiczne syntezy i rozkładu. Ich zewnętrznym przejawem może być ewolucyjna zmiana grubości warstewki rozdzielającej metalowe powierzchnie pary trącej (*serwowitnej*). Zapotrzebowanie tartej stalowej powierzchni na atomy miedzi również może zmieniać się w czasie. Powierzchnia *pobiera* je z oleju w zależności od chwilowego stanu powierzchni powodowanego wymuszeniami zewnętrznymi.

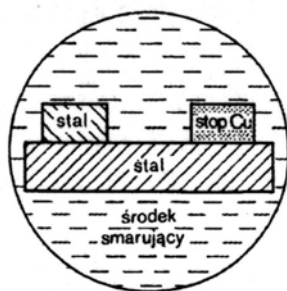
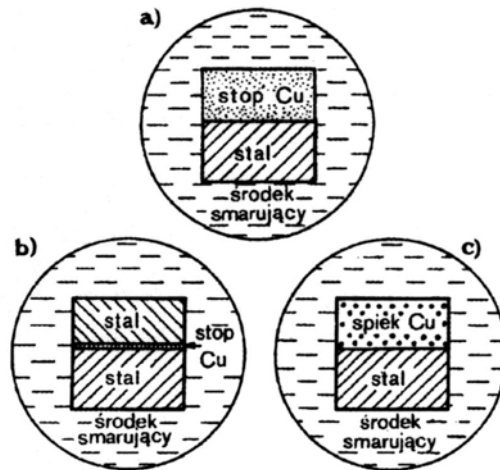
Rola związków kompleksowych miedziowców w obszarze tarcia układu stal - stal w środowisku olejowym polega prawdopodobnie na zmianie potencjałów powierzchni i zapobieganiu przez to zużyciu wodorowemu (blokowanie dostępu wodoru).

Powyższa hipoteza wymaga doświadczalnego potwierdzenia. Jest jednak wysoce prawdopodobna. Wszystkie dotychczasowe wyniki badań wykonanych w tym projekcie są z nią w zgodzie.

Znajomość istoty zjawiska Garkunowa, szczególnie w przemyśle nadal jest niedostateczna, a samo zjawisko nie zawsze poprawnie rozumiane; nadal bowiem zdarzają się przypadki zamiany materiału elementu maszyny wykonywanego dotychczas ze stopu miedzi na element stalowy (np. pierścień synchronizatora skrzyni biegów samochodu Polonez) i dopiero złe tego skutki dla całej maszyny (w tym przypadku - przekładni) spowodowały powrót do stanu wyjściowego.

Trzeba wyraźnie stwierdzić, że wiedza o korzystnym wpływie miedzi lub jej stopów na trwałość maszyny jest wiedzą potoczną, wynikającą z praktyki. Negatywne skutki zamiany elementów z niej wykonanych na inne materiały spowodowały przyjęcie zasady, aby bez istotnej potrzeby nie zmieniać ani konstrukcji ani materiałów tych zespołów, które w eksploatacji zachowywały się dobrze. Po pierwsze - nie należy szkodzić. Na rysunkach 6, 7 i 8 przedstawiono wszystkie możliwości wykorzystania zjawiska Garkunowa w konstrukcji, budowie i eksploatacji maszyn.

Rys. 6. Modele systemów tribologicznych z bezpośrednim kontaktem stopów (spieków Cu) z powierzchnią tarcia w środowisku oleju smarowego



Rys. 7. Model nadsystemu tribologicznego zgodnego z rysunkiem 5



Rys. 8. Model systemu tribologicznego stal-stal-środek smarujący zawierający: -dyspersję miedzi lub jej stopu, -organiczne związki Cu

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Podsumowując, dokonano weryfikacji zjawiska Garkunowa jako specyficznego procesu, w którym strumień energii tarcia jest skierowany na samoorganizację, a nie na wzrost entropii strukturalnej, jak to ma miejsce w przypadku tarcia granicznego lub suchego. W ujęciu termodynamicznym układ, w którym zachodzi ten proces, przypomina układ złożony z pary trącej i rozdzielającego ją trzeciego ciała. W warunkach smarowania hydrodynamicznego nie

występują bowiem straty masy spowodowane zużyciem, a praca tarcia idzie w całości na pokonanie tarcia wewnętrznego (ulega zmianie na ciepło).

W badaniach laboratoryjnych uzyskano, za pomocą maszyny tarciowej MT-1, taką graficzną formę wyników jaka do tej pory nie była spotykana w publikacjach. Stwierdzono także możliwość dalszego udoskonalenia tych badań poprzez odpowiednie, dalsze oprzyrządowanie maszyny.

LITERATURA

1. Garkunov D. N., Kragel'skij LV., Poljakov A.A.: *Izbiratel'nyj perenos v uzlach trenija (Effekt bezyznosnosti)*. Transport, Moskva 1969.
2. Garkunov D. N.: *Tribotechnika. Mašinostroenie*, Moskva 1985.
3. Polzer G., Meissner F.: *Osnovy trenija i iznašivanija. Mašinostroenie*, Moskva 1983.
4. Poljakov A. A.: *Izbiratel'nyj perenos kak model' mehanizma trenija. Trudy meždunarodnoj naučnoj konferencji TRIBO 85 (Taškent, 22=26 maja 1985)*, Moskva 1985.
5. Pićugin V. F.: *O mehanizme zbiratel'nogo perenosa pri iznašivanii pary mednyj splav stal'*. Trenie i iznos. T. V, nr 2, 1984.
6. Guzik J.: *Metoda wyznaczania charakterystyk tribologicznych olejów przekładniowych*. Tribologia, 1992, nr 5.
7. Guzik J.: *Praca doktorska nt.: Badania tribologicznych właściwości olejów przekładniowych*. WSI Radom - ITWL Warszawa, 1994.

THE SENSE, MODEL AND POSSIBILITIES OF USING GARKUNOV EFEKT I TECHNOLOGY

SUMMARY

The Garkunov effect is described in the paper. Process of formation and maintenance of lowfriction layer is differentiated. The technological external layer (*TWW*) during friction transforms itself to operational external layer (*EWYi*~ including chemisorbed compounds. The influence of additives and running-in of friction pair on *EWYi* durability is shown. The verified model of Garkunov effect is proposed and possibilities of their practical application is presented.

Recenzja: prof. dr hab. inż. Jan Burcan