

Ryszard MARCZAK\*, Dmitrij MOROZOW\*\*

## **JUBILEUSZ 90-LECIA URODZIN PROFESORA D.N. GARKUNOWA. JEGO ODKRYCIA NAUKOWE I WKŁAD W ROZWÓJ POLSKIEJ TRIBOLOGII**

**THE JUBILEE OF BIRTHDAY OF PROFESSOR D.N.  
GARKUNOW. HIS SCIENTIFIC DISCOVERIES AND INPUT  
IN THE DEVELOPMENT OF THE POLISH TRIBOLOGY**

### **Słowa kluczowe:**

tribologia, zjawisko Garkunowa, bezzużyciowe tarcie, zużywanie wodoro-  
rowe

### **Key words:**

tribology, Garkunow effect, wearless friction, hydrogen wear

### **Streszczenie**

Artykuł informuje o naukowych odkryciach Laureata Złotego Medalu Tribologii z 2005 r. – prof. D.N. GARKUNOWA i ich upowszechnianiu w Polsce w końcu ubiegłego i na początku XXI w. Traktuje więc o początkach biotribotechnicznego kierunku w tribologii oraz dokumentuje

---

\* emeryt, e-mail: ryszard.marczak@gmail.com

\*\* Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; e-mail: d.morozow@pr.radom.pl.

stan wiedzy wzbogacany badaniami eksperymentalnymi prowadzonymi w tym okresie w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn WSI Radow. Autorzy przedstawiają także krótki życiorys naukowy Jubilata.

### Odkrycia naukowe D.N. Garkunowa

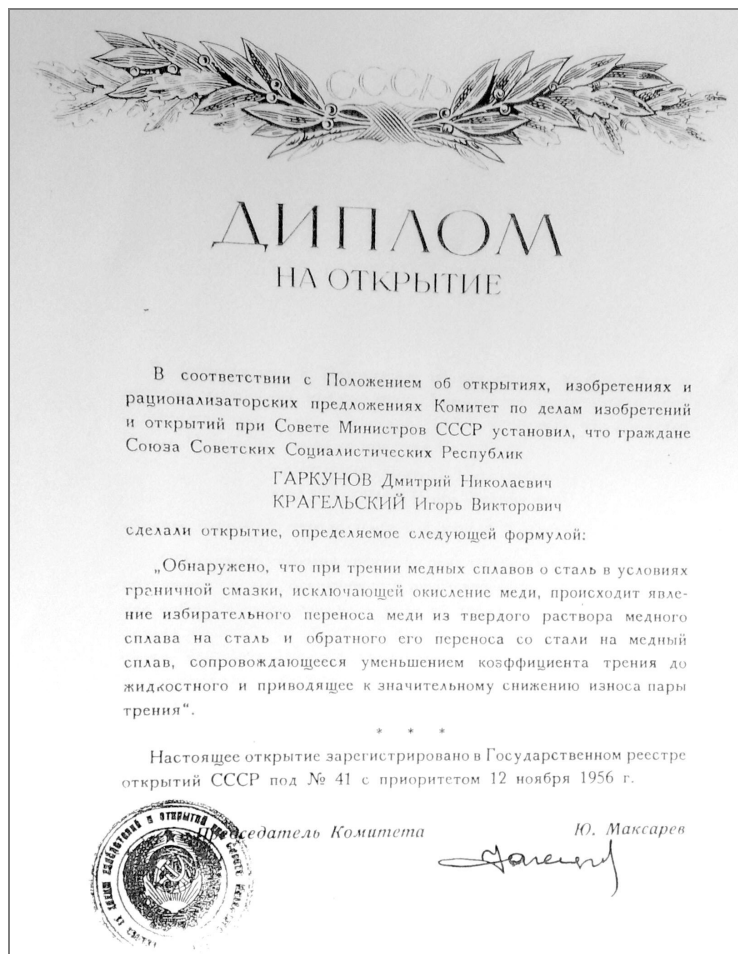
D.N. Garkunow urodził się 24 listopada 1919 r. we wsi Rożki w obwodzie kirowskim w Rosji. Studia wyższe ukończył w 1941 roku na Wydziale Fizyczno-Matematycznym Państwowego Uniwersytetu w Tomsku na Syberii na kierunku Fizyka Metali. Brał udział w II wojnie światowej; służył m.in. w oddziałach I Frontu Ukraińskiego dowodzonego przez I.S. Koniewa (wyzwolenie Krakowa!). Po wojnie został skierowany do Akademii Sił Powietrznych im. G.K. Żukowa, na której habilitował się w 1962 r. Z wojska odszedł w stopniu pułkownika i rozpoczął pracę w Instytucie Badawczym Lotnictwa. Z okresu służby i pracy naukowej w lotnictwie pochodzą jego pierwsze obserwacje dotyczące istoty niezwykłej trwałości, niektórych – wysokoobciążonych – kinematycznych węzłów samolotów IŁ. Były to węzły, w których stal współpracowała z brązem przy smarowaniu roztworem etanolu z gliceryną oraz stalowe połączenia przegubowo-śrubowe smarowane smarem zawierającym sproszkowaną miedź. Niezwykłą trwałość wykazywało także ułożyskowanie sprzężarek stosowanych w chłodziarkach domowych. Było ono kilkakrotnie większe niż trwałość łożysk tych sprzężarek stosowanych w innych urządzeniach. W wyjaśnianiu istoty tego fenomenu brał udział prof. I.W. Kragielski z Instytutu Maszynowiedzenia w Moskwie. Obydwaj ci wielcy tribolodzy zostali autorami naukowego odkrycia nr 41 wydanego im przez Państwowy Urząd Patentowy – Komitet przy Radzie Ministrów Rosji. Kserokopię tego dyplomu pokazano na **Rys. 1**.

Drugie, wielkie odkrycie dokonane przez D.N. Garkunowa dotyczyło wodorowego zużywania<sup>2</sup> się trących elementów maszyn. Z pokazanej na **Rys. 2** kserokopii dyplomu nr 378, wydanego dnia 8 lutego 1990 r. wynika, że weryfikacja prawdziwości hipotezy o wodorowej naturze eksploatacyjnego zużywania się metali trwała ponad 20 lat! Pierwszeństwo autorstwa hipotezy przyznano z dniem 7 maja 1967 r., a pierwszeństwo

---

<sup>2</sup> Zużywaniami wodorowym, pochodzenia technologicznego, niskostopowych stali o wysokiej wytrzymałości mechanicznej, jako jeden z pierwszych w świecie zajmował się M. Śmiałowski [L. 1].

doświadczalnego wykonania jej weryfikacji (na podstawie odkrycia nr OT-7026) od 24 listopada 1968 r.

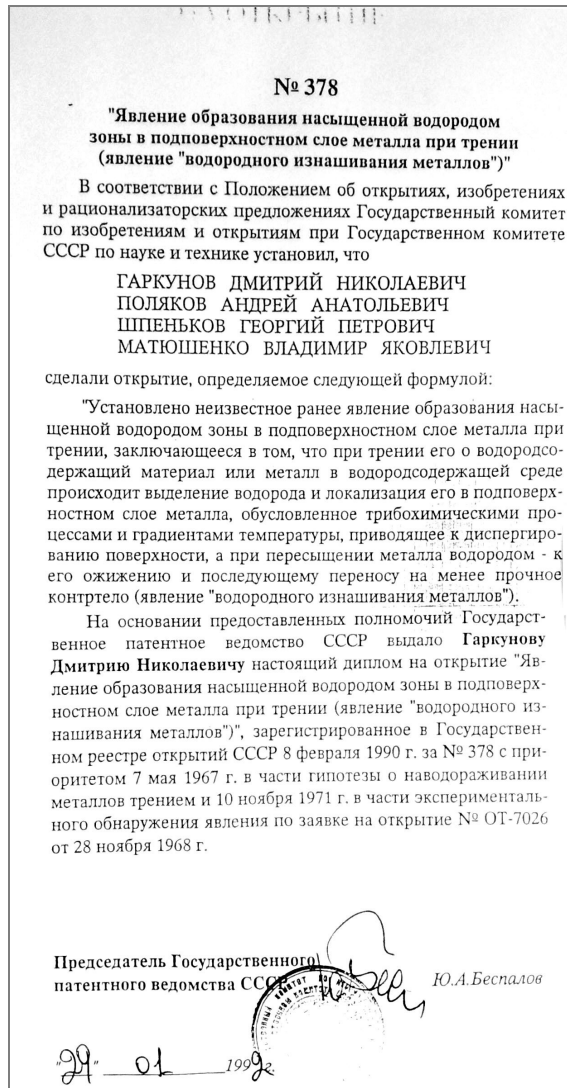


**Rys. 1. Kserokopia dyplomu nr 41 na pierwszeństwo odkrycia zjawiska selektywnego przenoszenia (SP) z datą od 12 listopada 1956 r.**

Fig. 1. Copy of the Diploma No. 41 that confirms the discovery of the selective transfer phenomenon dated November 12<sup>th</sup>, 1956

Zużywanie wodorowe trących elementów maszyn pojawia się jako efekt synergicznego współdziałania zjawisk powierzchniowych: egzotermisji elektronów, adsorpcji i tribodestrukcji, które prowadzą do wydzielania wodoru. Wraz z procesami nierównowagowymi, zachodzącymi

podczas deformacji warstwy wierzchniej metalu pojawiają się: gradienty temperatury, pola elektryczne i magnetyczne oraz pola naprężeń. Prowadzi to do dyfuzji wodoru do wnętrza warstwy wierzchniej, a następnie – do zużywania wodorowego.



**Rys. 2. Kserokopia dyplomu nr 378 na odkrycie wodorowego zużywania się trących detali maszyn**

**Fig. 2. Copy of the Diploma No. 378 that confirms the discovery of the hydrogen mechanism of wear**

### **Pierwsze kontakty z prof. D.N. Garkunowem**

O pierwszych kontaktach z tribologią rosyjską autor<sup>1</sup> pisze w [L. 2]; że podczas wizyty w latach 70. ub. wieku w Instytucie Maszynowiedzenia u prof. I.W. Kragielskiego został krótko poinformowany o wynikach prowadzonych tam badań: „2 lata pracuje u nas maszyna, a zużycia nie ma”. Tak narodziło się zainteresowanie „bezzużyciowym tarcie” (BT), w tym czasie nazywanym też: „selektywnym przenoszeniem” (SP) i potrzeba nawiązania bezpośredniego kontaktu z prof. Garkunowem. Doszło do tego nieco później, podczas spotkania na jednej z tribologicznych konferencji w Rosji. D.N. Garkunow fascynował nie tylko jako uczony, obdarzony głęboką intuicją i spostrzegawczością, ale także jako człowiek. Jest bowiem humanistą wielkiego formatu. Takie były początki późniejszej współpracy i głębokiej, obopólnej przyjaźni. Współpraca rozwijała się pomyślnie, strona rosyjska udzielała wszechstronnych informacji o prowadzonych badaniach naukowych „bezzużyciowego tarcia”. Braлиśmy udział w licznych konferencjach w Rosji, Polsce, NRD i innych krajach RWPG. Ukształtowany w tym okresie pogląd na temat występowania i spodziewanej efektywności zastosowań „zjawiska Garkunowa” w technice został przedstawiony w postaci referatu [L. 3] na otwartym zebraniu naukowym KBM PAN (Borków k. Kielc, 1991.10.03). Dzięki bardzo życzliwemu poparciu uczestników zebrania IEPiM uzyskał grant [L. 4] na kompleksową realizację zagadnień związanych z ww. problematyką.

### **Realizacja grantu pt. „Niskotarciowe pokrycia roboczych powierzchni kinematycznych węzłów maszyn”, projekt badawczy nr 7 7070 91 02**

Przystępując w 1992 r. do badań w ww. projekcie, dysponowaliśmy „na wejściu” wiedzą opartą głównie o dostępne w publikacjach wyniki badań uczonych byłego Związku Radzieckiego. Z publikacji tych wynikało, że można uzyskać w smarowanych węzłach tarcia warunki, w których zużycie elementów trących jest bardzo małe mimo niewystępowania tarcia płynnego. Za pomocą systemu komputerowego DIALOG, obejmującego światową literaturę naukową, przeprowadzono poszukiwania dotyczące „zjawiska Garkunowa”. Stwierdzono, że w bazie CA SEARCH, opartej o „Chemical Abstract”, w okresie od 1987 do maja 1993 r. były tylko 23 pozycje literaturowe bezpośrednio dotyczące badanego zjawiska, pocho-

dzące głównie z ZSRR, Polski, Niemiec oraz 1 pozycja z Francji. Dla tego samego okresu przeprowadzone dodatkowo badania literaturowe, odpowiednio połączone z opisowymi określeniami, takimi jak: dodatki przeciwtarciowe, związki miedziowców itp. wykazały występowanie 51 interesujących pozycji. Uogólniając stwierdzono, że „niskotarciowe dodatki do olejów smarowych były w tym czasie powszechnie badane”, lecz najwięcej prac teoretycznych i eksperymentalnych pochodziło ze wschodu Europy, natomiast najwięcej patentów z tej dziedziny – z zachodu oraz z USA.

Na półmetku realizacji grantu zorganizowano w Instytucie Eksploatacji Pojazdów i Maszyn (IEPiM) WSI Radom w maju 1993 r. krajową konferencję z udziałem gości zagranicznych na temat: „Problemy bezzużyciowego tarcia w maszynach”. Koncepcję konferencji wcześniej uzgodniono z D.N. Garkunowem, który zgodził się być Przewodniczącym Komitetu Naukowego i zaproponował listę rosyjskich tribologów, których jego zdaniem należało zaprosić.



**Rys. 3. Prof. D.N. Garkunow na konferencji w IEPiM**

Fig. 3. Professor Garkunov during the seminar organized by the Institute of the Maintenance of Vehicles and Machines

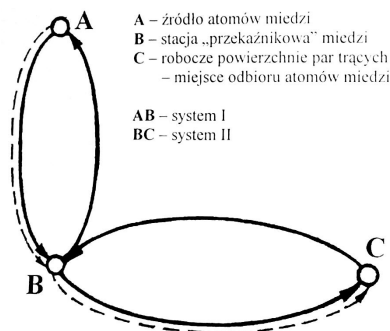
Ogółem w konferencji wzięło udział 85 osób, w tym 41 profesorów (z Rosji – 11, z Niemiec – 2, Mongolii – 1, Bułgarii – 1). Wygłoszono 10 referatów rosyjskich i 10 polskich, które zostały opublikowane w materiałach konferencyjnych [L. 5]. W przebiegu konferencji można wyróżnić:

- a) przedstawienie przez stronę rosyjską ich dokonań w dziedzinie badań i występowania zjawiska „selektywnego przenoszenia” (SP), jego isto-

ty i praktycznych zastosowań; przedstawiono także koncepcję założeń organizacyjnych i utworzenia „Międzynarodowego Instytutu Problemów Bezzużyciowego Tarcia” w Moskwie, z filiami w Polsce (w IEPiM) i w Niemczech;

- b) przedstawienie przez stronę polską założeń, programu i dotychczasowych wyników badań w projekcie badawczym nr 7 7070 91 02 oraz prezentację innych prac z obszaru SP prowadzonych w Polsce i nowoczesnych metod badań fizykochemicznych związanych z problematyką badań tribologicznych;
- c) sesję wyjazdową do Krakowa (14–15.05) w celu zwiedzenia Instytutu Podstaw Metalurgii PAN oraz Laboratorium Środowiskowego przy UJ;
- d) program kulturalny – zwiedzanie Krakowa.

Efektom konferencyjnych dyskusji było ugruntowanie się poglądu o potrzebie dalszych badań nad istotą „zjawiska Garkunowa”.



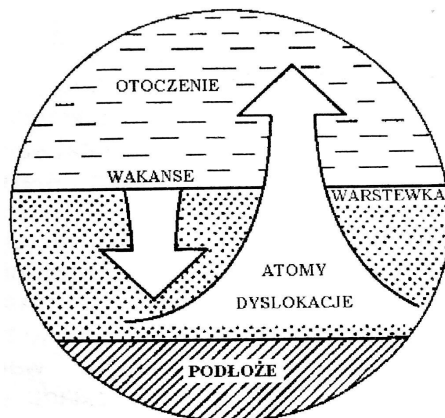
**Rys. 4. Materiałowy model układu „zjawiska Garkunowa” zachodzącego w chłodziarkach domowych wg R. Marczaka**

Fig. 4. Materials model of the Garkunov effect demonstrated in the household refrigerators (according to R. Marczak)

Zjawisko Garkunowa występujące w chłodziarkach domowych polega na pobieraniu atomów miedzi przez freon ze źródła A (tj. z przewodów miedzianych) i dostarczaniu 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 wydzielają się, tworząc warstewkę miedzi o szczególnych właściwościach, nazywaną „**warstewką serwowitną**”. Warstewka serwowitna rozdziela trące się powierzchnie, a taki rodzaj kontaktu przypomina wg Garkunowa kontakt występujący w stawach żywych istot. Jest on uniwersalny i występuje

u człowieka, zwierząt, ptaków i ryb. Podobny rodzaj kontaktu można także uzyskać w maszynach, np. poprzez zastosowanie smaru metaloplastrującego rozdzielającego współpracujące powierzchnie węzłów trących. Podobieństwo funkcjonowania łożysk mechanicznych do stawów – występujących w przyrodzie ożywionej wpłynęło na nazwę tego nowego kierunku w tribologii – **biotribotechnika**.

Fizykochemiczny model funkcjonowania serwowitnej warstewki, pokazany na **Rys. 5**, występuje wg A.A. Poljakowa wtedy, gdy lokalizacja procesu tarcia zachodzi w cienkiej metalicznej warstewce zdolnej do dyssypacji energii i materii. Dyssypacja przedstawiona jest jako zachodzący w tej warstewce proces wzajemnej absorpcji dwóch, skierowanych w przeciwnych kierunkach, strumieni dyfuzyjnych. Od powierzchni w głąb warstewki porusza się strumień wakansów, natomiast ku powierzchni wędruje strumień dyslokacji i atomów. Wakanse powstają w wyniku specyficznego oddziaływania środka smarującego, dzięki czemu atomy metali warstewki uwalniane są z jej powierzchni; natomiast dyslokacje tworzą się na skutek deformacji tej warstwy.



**Rys. 5. Model funkcjonowania serwowitnej warstewki wg A.A. Poljakowa**

Fig. 5. Functional model of the layer according to A. A. Poliakov

Można więc przyjąć, że występowanie serwowitnej warstewki należy zaliczyć do samoorganizujących się procesów przyrody nieożywionej, które zachodzą w systemie tribologicznym termodynamicznie otwartym. Funkcjonowanie tego systemu, zgodnie z poglądem R. Marczaka, za-



pewnia termodynamiczna reguła przekory Le Chateliera i Browna<sup>3</sup> poprzez utrzymywanie równowagi pomiędzy liczbą wakansów a liczbą dyslokacji, wymuszeniami zewnętrznymi a stanem układu.

Serwowitna warstewka miedzi ma strukturę, w której ponad 10% węzłów sieci nie jest zajęte przez atomy. Z tego względu można ją traktować jako quasi-ciecz 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 serwowitnej warstewki rozdzielającej metalowe powierzchnie pary trącej. „Zapotrzebowanie” tartej, stalowej powierzchni na atomy miedziowców również może zmieniać się w czasie. Powierzchnia niejako je „pobiera” z oleju w zależności od chwilowego stanu powierzchni powodowanego wymuszeniami zewnętrznymi.

Zagadnienia prezentowane i dyskutowane na konferencji dotyczyły wszystkich stanów istnienia maszyny, tj. projektowania, wytwarzania i eksploatacji. Jako obiecujący kierunek badań, wynikający z faktu, że podczas selektywnego przenoszenia powstaje dyssypatywna struktura charakteryzująca się wymianą atomów metalu i materiału smarnego poprzez tworzenie i rozpad związków koordynacyjnych, uznano badania tribochemiczne. Wykazano znaczącą rolę „rozpuszczania” powierzchni i wakanso-dyslokacyjnego mechanizmu deformacji serwowitnej warstewki na przebieg procesu. Powierzchnia tarcia tak na poziomie subatomów (egzoelektronowa emisja), jak i na poziomie atomów (tworzenie defektów sieciowych) cały czas znajduje się w stanie wzbudzonym. Taki mechanizm funkcjonowania serwowitnej warstewki, opartej o jej chemizm, stworzył potrzebę nawiązania bliższej współpracy pracowników IEPiM z tribochemikami: prof. W.F. Piczuginem z Moskwy i prof. A.S. Kużarowem z Rostowa n. Donem.

---

<sup>3</sup> Termodynamiczna reguła przekory głosi: „Jeżeli układ, znajdujący się w stanie równowagi, zostanie poddany jakiemuś nowemu działaniu z zewnątrz, to w układzie zajdą takie przemiany, które działanie tego bodźca zmniejszą i doprowadzą do nowego stanu równowagi, możliwie niezbyt odległego od stanu wyjściowego”.

Warto przypomnieć w tym miejscu poruszony na konferencji przez W.N. Bystrowa fakt, że w 1992 r. Rosyjskie Publiczne Stowarzyszenie Naukowo-Technologiczne do selektywnego przenoszenia i samoorganizacji systemów tarcia wraz z International Council of Selective Transfer and Frictional Coating w Moskwie podjęły decyzję o utworzeniu Międzynarodowego Instytutu Problemów Bezzużyciowego Tarcia w Samochodach. Głównymi inicjatorami utworzenia tego Instytutu były Rosja i Polska. Wybrano akcyjną formę własności Instytutu, a głównymi udziałowcami ze strony Rosji miały być Centrum Przemysłowo-Technologiczne „Rem-Awto” oraz Spółka Akcyjna „Resurs”, ze strony Polski – Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn w WSI Radom. Celem Instytutu miało być zjednoczenie potencjału naukowo-technicznego do przeprowadzenia badań podstawowych zjawiska bezzużyciowego tarcia, zużycia wodorowego oraz na ich podstawie opracowanie nowych materiałów i technologii do zastosowań technicznych.



**Rys. 6. Kolacja w restauracji Wierzynek w Krakowie**

Fig. 6. Supper at Wierzynek restaurant

W sesji wyjazdowej do Krakowa wzięli udział wszyscy goście zagraniczni oraz kilkoro polskich uczestników. Celem wyjazdu było zapoznanie się z technikami i aparaturą pomiarową stosowaną do badań powierzchni ciała stałego i warstwy wierzchniej w Instytucie Podstaw Metalurgii PAN oraz w Laboratorium Środowiskowym przy UJ, a w szczególności z metodami: spektroskopii fotoelektronów, spektroskopii elek-

tronów Augera, spektroskopii jonów wtórnych, elektronowej mikroskopii skaningowej, mikroanalizy RTG, analitycznej elektronowej mikroskopii transmisyjnej i rentgenografii strukturalnej.

W ramach programu kulturalnego odbyło się zwiedzanie Wawelu i Krakowa.



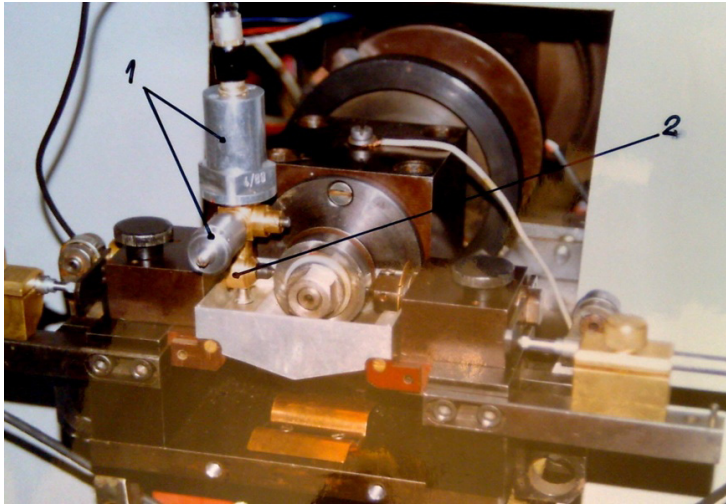
**Rys. 7. Na rynku w Krakowie**

Fig. 7. Marketplace in Cracow

Realizację projektu badawczego zakończono w 1994 r. Patrząc z dzisiejszej perspektywy, do jego efektów należy zaliczyć:

- ugruntowanie się poglądu, że w przebiegu zjawiska Garkunowa można wyróżnić dwa procesy, które w rzeczywistości mogą występować łącznie: pierwszy – to proces naplaterowania się na robocze powierzchnie par trących warstwy metalu; drugi – funkcjonowania tego pokrycia w warunkach wymuszeń eksploatacyjnych;
- wykonanie dwóch prac doktorskich (J. Guzika i A. Kotnarowskiego) oraz opublikowanie 25 artykułów;
- opracowanie wielu metod otrzymywania różnych środków niskotarciowych, w tym rozpuszczalnego w węglowodorach organicznego związku złota (syntorg Au);

- dostosowanie maszyny tarciowej MT1 do badań samowzbudnych drgań pary trącej w procesie tarcia, co umożliwiło pomiary widm spektralnych charakterystyk tarcia dla wszystkich układów materiałowych. Widok maszyny MT1 z zamontowanymi czujnikami pokazano na **Rys. 8**.



**Rys. 8. Maszyna MT1 z zamontowanymi piezoelektrycznymi czujnikami; (1 – czujniki AC – Z, 2 – trzpień do mocowania czujników)**

Fig. 8. The MTI test rig with piezoelectric sensors (1 – sensors AC-Z, 2 – arbor of sensors)

Do uzyskania takich wyników w granicę w ogromnym stopniu przyczyniła się dobra współpraca z tribologami rosyjskimi, szczególnie z D.N. Garkunowem. Do osiągnięć zespołu wykonawców należy zweryfikowanie i bliższe określenie 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. Opracowano ogólne zasady prowadzenia badań tribologicznych za pomocą maszyny tarciowej MT1: *badania powinny umożliwiać jednoznaczną identyfikację rodzaju tarcia występującego w danej chwili w badanej parze. Z definicji tarcia mieszane głoścącej, że jest to tarcie dwóch współpracujących powierzchni nieprzedzielonych ciągłą warstwą smaru wynika, iż obydwie te powierzchnie kontaktują się ze sobą bezpośrednio, stykając się występami*

ich mikronierówności. Identyfikacji rodzajów tarcia dokonuje się, mierząc – oprócz innych parametrów – wartość rezystancji elektrycznej  $R$  pomiędzy elementami pary trącej. Jeżeli rezystancja osiągnie wartość bliską 0, świadczy to o nawiązaniu styku metal–metal trących się powierzchni oraz o przerwaniu ciągłości filmu olejowego i wystąpieniu tarcia mieszanego. Metoda powinna zapewniać możliwość uzyskiwania zadanej i stabilnej wartości nacisku. Wynikał stąd wymóg styku obydwu kontaktujących się powierzchni polami o zadanej stałej wielkości; wymóg ten spełniano na skutek wcześniejszego dotarcia próbek, w obecności tego samego środka smarnego, który był używany w badaniach.

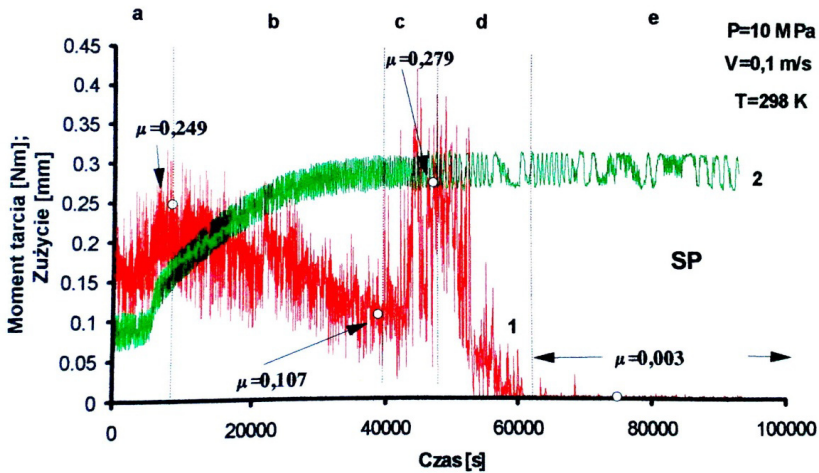
Badania zasadnicze były poprzedzane próbami wstępnymi w celu wyznaczenia krytycznych wartości: nacisku jednostkowego  $P_{kr}$ , prędkości ślizgania  $V_{kr}$ , temperatury  $T_{kr}$  i zużycia  $Z$ .

Z reguły wyznaczano następujące charakterystyki:

- a)  $\mu, R, Z = f(P)$  dla  $V$  i  $T = \text{const}$ .
- b)  $\mu, R, Z = f(V)$  dla  $P_{kr}$  i  $T = \text{const}$ .
- c)  $\mu, R, Z = f(T)$  dla  $P_{kr}$  i  $V_{kr} = \text{const}$ .
- d)  $\mu, Z = f(T)$  dla  $T, V, P = \text{const}$ .

Pomiar krytycznych wartości  $P, V, T$  pozwala na wyznaczenie warunków trwałości warstwy granicznej; badając zależność momentu tarcia i wielkości zużycia od czasu tarcia można (dla wybranych układów materiałowych) wyznaczyć (zobrazować) obszary występowania selektywnego przenoszenia. Na **Rys. 9** i **10** zamieszczono dwie charakterystyki  $\mu, z = f(t)$ , podczas których dokonywano zapisu wartości mierzonych wielkości w odstępach co 60 sekund oraz mierzono wibrospektralne charakterystyki procesu tarcia dla normalnego i stycznego kierunku do powierzchni tarcia (ustawionych na jednej z próbek) w taki sposób, aby zabezpieczyć bezpośredni styk pomiędzy próbką a czujnikiem.

Z przedstawionych wyżej zależności wynika, że na przebieg zjawiska ma wpływ wielkość zadawanego obciążenia oraz czas tarcia. Na **Rys. 9** i **10** można wyróżnić obszary a) i b), w których przebieg charakterystyk momentu tarcia i wielkości zużycia przypomina klasyczne docieranie; w obszarze c) obserwuje się „nieoczekiwany” wzrost wartości momentu tarcia, po czym w obszarze d) – spadek, praktycznie o 2 rzędy (w przeliczeniu na współczynnik tarcia). W obszarze e) – mamy przykładowy obraz „bezzużycia”. Mimo upływu czasu nie obserwuje się przyrostu zużycia, a wartość współczynnika tarcia jest mniejsza od 0,003.

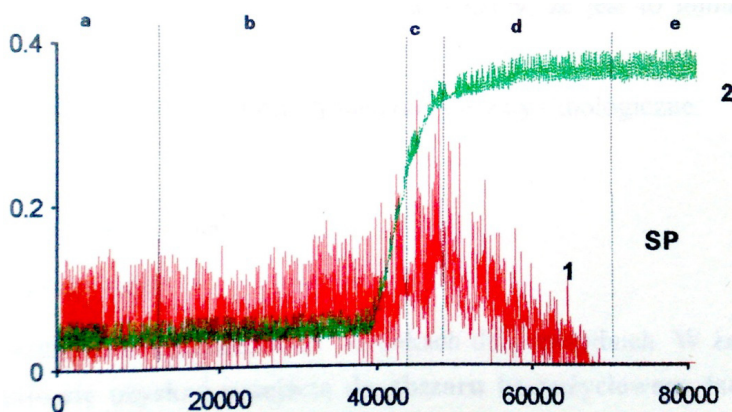


Rys. 9. Zależność współczynnika tarcia  $\mu$  (z przeliczenia momentu tarcia) i wielkości zużycia od czasu tarcia wyznaczonych za pomocą maszyny MT1; przeciwpróbka – stal 45, próbka – mosiądz MO-59, środek smarowy – roztwór gliceryny (80%) i wody (20 %); krzywa – 1 obrazuje przebieg zmian momentu tarcia z zaznaczonymi w punktach ekstremalnych wartościami współczynnika tarcia; krzywa 2 obrazuje przebieg zmian wielkości zużycia próbek

Fig. 9. Measurements of the friction coefficient (obtained from the friction moment) and wear rate vs. time from the test rig MTI. Specimen: MO-59 brass; counter-specimen: C45 steel; lubricant: solution of glycerine (80%) and water (20%). The curve 1 concerns the friction moment variations, the curve 2 shows the changes of the wear rate

Przyjmując za prawdziwe poglądy Poljakowa i Piczugina, że w obszarze „bezzużycia” powierzchnia rzeczywistego styku obu powierzchni wzrasta o 2–3 rzędy, a pojedynczego mikrostyku tyle samo razy się zmniejsza, należy przyjąć, że „przejście” ze świata tarcia granicznego, w którym rozmiary pojedynczych mikrostyków są rzędu mikrometra, do świata „bezzużycia” wiąże się z potrzebą rozpatrywania zjawisk o wielkości nanometrów i mniejszych – subatomowych (egzoemisja elektronów). Oscylacyjny charakter zmian mierzonych wielkości świadczy, że jest to immanentna cecha procesów tarcia. Przedstawione na **Rys. 9 i 10** charakterystyki są pozytywną weryfikacją prawdziwości termodynamicznej reguły przekory Le Chatelier’a i Browna i podkreślają potrzebę posługiwania się nią w badaniach tribologicznych.





**Rys. 10.** Zależność zmian mierzonych wielkości, badanych w identycznych warunkach, jakie występowały wyżej (rys. 9); różnice dotyczyły jedynie wartości obciążenia jednostkowego. W przedziale czasu do 40 000 sekund wynosiło ono 5 MPa , po czym podwyższono je do 10 MPa

Fig. 10. Measurement of friction and wear for conditions of the Fig. 9 with changed contact pressure (for time period 40 000 s the pressure was 5MPa and 10 MPa)

Przydatność przyjętego w granice programu realizacji badań potwierdziła się na przykładzie badań efektywności stosowania dyspersji teflonowej jako dodatku do olejów silnikowych w samochodach. W literaturze tematu [L. 7] były one pozytywnie oceniane jako znakomity dodatek polepszający pracę i sprawność silników samochodowych. Nasze wyniki były zgodne z powyższymi i to zarówno w badaniach laboratoryjnych, jak i w początkowej fazie badań eksploatacyjnych samochodu. Te pozytywne wyniki nie potwierdziły się w dalszym przebiegu eksploatacji samochodu. Wykryto wręcz szkodliwe oddziaływanie dyspersji teflonowej na trwałość silnika. Wyniki te przedstawiono na różnych konferencjach oraz opublikowano w Tribologii [L. 8], co w efekcie miało wpływ na całkowite zaniechanie w Polsce „uszlachetniania” oleju silnikowego za pomocą dyspersji teflonowej. Zasada, że wyniki badań tribologicznych, uzyskane za pomocą maszyn tarciovych, powinny być weryfikowane badaniami eksploatacyjnymi, umocniła się.

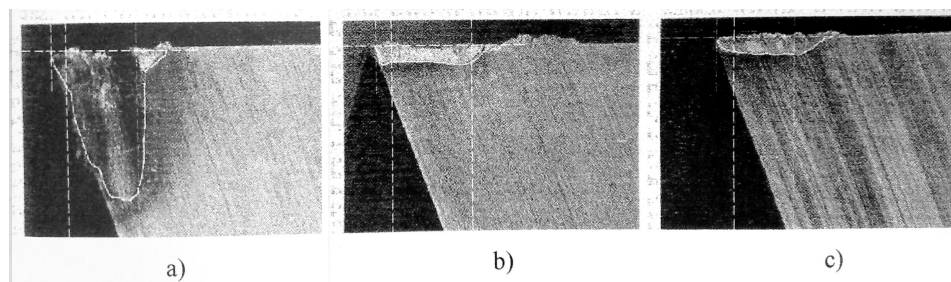
## **Wpływ D.N. Garkunowa na rozwój tribologii i upowszechnianie jego odkryć w Polsce**

Pokłosiem zakończonego grantu był znaczny wzrost zainteresowania odkryciami D.N. Garkunowa w Polsce. On sam był częstym gościem konferencji tribologicznych i korozyjnych organizowanych u nas w kraju. Wzajemna współpraca rozwijała się pomyślnie i przejawiała – nowymi elementami, np. pobytem na stażu naukowym, krótko- i długookresowym. Wymiana osobowa odbywała się między Polską, Federacją Rosyjską (głównie) i Niemcami (były jeszcze staże z innych krajów RWPG, a także z Wietnamu i Mongolii). W Polsce dysponowaliśmy w tym czasie już bardziej nowoczesną aparaturą do badań materiałowych i tribologicznych. Staże doktoranckie w Polsce, zwłaszcza na stypendium rządowym, były atrakcyjne. W IEPiM odbyli je: Quah Dinh Lien (Wietnamczyk), G. Gantulga (Mongol), Dmitrij Morozow (Rosjanin). Były także staże krótsze dla wykonania określonych badań. Można tu wymienić kilkumiesięczny pobyt Eleny G. Zadoszenko i Andrieja A. Kużarowa oraz krótsze – Wiktorii E. Burłakowej i Aleksandra S. Kużarowa. Było i odwrotnie. Kilku polskich doktorantów odbyło w tym czasie staże naukowe w Rosji i Niemczech.

IEPiM utrzymywał bliską współpracę z kilkoma innymi ośrodkami naukowymi w Polsce dysponującymi w tym czasie wyspecjalizowaną aparaturą naukowo-badawczą w zakresie badań materiałowych, analizy powierzchni ciała stałego i innych metod. Można tu wymienić: Instytut Podstaw Metalurgii PAN w Krakowie, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie, Instytut Chemii Fizycznej PAN w Warszawie, Uniwersytet Łódzki – dysponujący w tym czasie pierwszym w Polsce mikroskopem sił atomowych; współpracowaliśmy także z Instytutem Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie oraz z Wojskowym Instytutem Techniki Panczernej i Samochodowej w Sulejówku. Efektem tej współpracy były wspólne, liczne publikacje w czasopismach krajowych i zagranicznych oraz prezentacje wyników badań na konferencjach w kraju i za granicą. W bibliografii tego artykułu podano przykładowo niektóre z nich [L. 9–16]. Strona rosyjska doceniała współpracę z IEPiM. Świadczą o tym: powołanie R. Marcza w 1996 r. w skład zagranicznych członków Akademii Problemów Jakości w Moskwie i nadanie mu w 1999 r. godności honorowego profesora Dońskiego Państwowego Uniwersytetu Technicznego w Rostowie n. Donem.



Nie udało się, niestety, zrealizować zamierzeń dotyczących opracowania i badania dodatków do olejów silnikowych, umożliwiających występowanie w strefie tarcia serwowitnej warstewki tak, jak to zaplanowano wcześniej. Wyniki badań tych dodatków, prowadzone w Polsce, miały bowiem posłużyć także do doktoratu D. Morozowa. Stało się jednak inaczej, a powodów było wiele. Przemysł naftowy nie był zainteresowany takim nowym dodatkiem. W Polsce, w tym czasie, produkowano już oleje silnikowe o wysokiej jakości, a poza tym można było nabyć z importu oleje silnikowe o najwyższej jakości. Opublikowano w tribologii artykuł [L. 17] kwestionujący możliwość uzyskania serwowitnej warstewki w oleju; nie wpłynęło to korzystnie na całokształt realizowanych zamierzeń i zewnętrzne oceny perspektywicznych wdrożeń.



**Rys. 11. Komputerowy obraz ostrza z obrysem śladu zużycia (a – emulsja bez dodatku, b – emulsja + 0,5 % Mo, c – emulsja + 0,5 % Cu)**

Fig. 11. The computer image of the blade showing wear (1 – emulsion without an additive, 2 – emulsion + 0,5% Mo, 3 – emulsion + 0,5% Cu)

Po zrezygnowaniu w 1997 r. R. Marczaka (70 lat) z funkcji dyrektora IEPiM i kierownika Zakładu Tribologii zmniejszyły się jego możliwości sprawcze i organizacyjne. Zmienił się także kurs w polityce państwa w stosunku do FR. Przede wszystkim zabrakło, wcześniej zaplanowanych, środków finansowych na filialny udział IEPiM w moskiewskim Instytucie. Wreszcie, z nieznanых przyczyn, D.N. Garkunow przestał w XXI w. przyjeżdżać do Polski. Co prawda nadal przysyłał swoje książki, korzystając z okazji pobytu polskiego gościa w Rosji, ale próbek opracowywanych tam dodatków do olejów nie otrzymywaliśmy. D. Morozow, współautor niniejszego artykułu, obronił swoją rozprawę doktorską [L. 18] w 2000 r. Nie dotyczyła ona jednak dodatków do olejów silnikowych, lecz traktowała o wpływie dodatku dyspersyjnych cząstek Mo i Cu do wodno-olejowych cieczy smarująco-chłodzących. Wyniki tych

badania były bardzo obiecujące. Wykazano, że w porównaniu z cieczą smarująco-chłodzącą bez dodatków obydwie te dodatki (Mo i Cu) obniżają pobór mocy potrzebnej na wykonanie takiej samej pracy (skrawania) o 50%. Zużycie narzędzia skrawającego było przy tym ponad pięciokrotnie mniejsze (**Rys. 11**).

Podsumowując – w ostatnim dziesięcioleciu ub. wieku wzrosło w Polsce zainteresowanie dodatkami uszlachetniającymi środki smarowe i ciecze smarująco-chłodzące. Dość powszechnie je badano, zarówno te pochodzenia krajowego, jak i zagranicznego. W eksploatacji znalazły zastosowanie jako dodatki do niektórych cieczy smarujących i smarów dyspersyjne różnych metali. Bardzo efektywnym okazał się dodatek zdypergowanych cząstek Mo, jeśli był dodawany do środka smarującego zawierającego siarkę. Co prawda niezłe rezultaty przynosiły proszki także innych metali, np. Cu. Zakończono w IEPiM z pozytywnym rezultatem badania tulei cylindrowych silników, pokrytych metodą FABO (autorstwa prof. G. Polzera) cienką warstwą (1,5–2,0  $\mu\text{m}$ ) mosiądzu lub miedzi, nie znalazły zastosowania w polskim przemyśle samochodowym z powodów przedstawionych w [**L. 8**].

## ZAKOŃCZENIE

Prof. P. Jost zwrócił się na początku XXI w. do prof. R. Marcza z prośbą o zaopiniowanie całokształtu dorobku naukowego, dydaktycznego i technicznego prof. D.N. Garkunowa jako kandydata do wyróżnienia Złotym Medalem Tribologii. Opinia została napisana w terminie, jednakże pewnym zaskoczeniem dla opiniującego był fakt, że w tym roku wyróżnienie dostał inny tribolog. D.N. Garkunow to najwyższe odznaczenie w tribologii otrzymał dopiero w 2005 r.

W Rosji opracowano materiały smarowe zawierające metaloplateryjny, rozpuszczalny w olejach, wielofunkcyjny dodatek „Walena” lub „Serwowit”. Oba dodatki zawierają związki metali o zmiennej walencyjności: Zn, Sn, Pb, Cu, Ni w postaci soli halogenidów. Na roboczych powierzchniach pary trącej tworzą się z tych dodatków warstewki o grubości 0,5–1,5  $\mu\text{m}$ . Warstewka ta jest porowata, ma dużo wakansów, gwarantuje występowanie bardzo niskiej wartości współczynnika tarcia, jest odporna na duże obciążenia i samoodnawialna. Zawartość dodatków w smarze wynosi 2–4%, w oleju 3–6%. Producent dodatków rekomenduje ich efektywność następująco: zmniejszanie zużycia paliwa o 10%,

zmniejszanie zużycia smarów 2–2,5 razy, zmniejszenie zapotrzebowania na części zamienne 3 razy, zwiększenie żywotności silnika 1,5–2 razy, zmniejszenie zawartości CO w emitowanych spalinach – 2 razy. Opracowanie tych dodatków sprawiło, że w FR obserwuje się powszechne zastępowanie tradycyjnych środków smarowych – metaloplaterującymi. Rekomendowana efektywność zastosowań jest zaskakująco wysoka.

Z przeprowadzonych badań w IEPiM wynikało, że jeśli do oleju silnikowego, zawierającego pakiet tradycyjnych dodatków uszlachetniających, dodano nowego środka, zawierającego związki miedziowców (Cu, Ag, Au), to niekiedy występował antagonizm pomiędzy tymi dwoma typami dodatków. Zastrzeżenie to nie wyklucza możliwości występowania synergizmu – tj. zwiększenia skuteczności. W Rosji było wiele gatunków środków smarowych niezawierających żadnych albo bardzo mało dodatków uszlachetniających. Być może, że z tego powodu wynika bardzo wysoka efektywność zastosowania opracowanych dodatków metaloplaterujących.

Metoda FABO jest aktualnie stosowana w Rosji, Niemczech i na Ukrainie w technice lotniczej, transporcie samochodowym i kolejowym. Korzyści wynikające z zaniechania procesu honowania (w końcowej obróbce tulei cylindrowych), a zastąpienia go pokryciem – cienką warstwą miedzi lub mosiądzu wynikają z określonych korzyści eksploatacyjnych i zmniejszenia zużycia paliwa o około 3%.

W związku z 90 rocznicą urodzin, która minęła w 2009 r. PT Uczestnicy Jesiennej Szkoły Tribologicznej w Nałęczowie podpisali list gratulacyjny wysłany do Jubilata. W rewanżu prof. D.N. Garkunow przesłał na ręce Autora<sup>1</sup> 60 dyskietek z angielskojęzyczną wersją swojej ostatniej książki z przeznaczeniem dla zainteresowanych tymi zagadnieniami polskich tribologów.

W dniu 8 marca br. Prof. R. Marczak otrzymał zaproszenie do wzięcia udziału w Międzynarodowej Naukowo-Technicznej Konferencji pt.: „TRIBOLOGIA I EKOLOGIA” (nauka, kształcenie, praktyka) organizowanej w Moskwie w dniach 22–23 kwietnia 2010 r. Konferencję otworzył Rektor Moskiewskiego Uniwersytetu Rolniczego, a prof. P. Jost – Przewodniczący Międzynarodowej Rady Tribologii wygłosił referat na temat: „Rozwój prac w obszarze zielonej tribologii i jej problemy”. Temat tej konferencji jest wielkim uznaniem zasług prof. D.N. Garkunowa. Otrzymał już wiele nagród, w tym Prezydenta FR oraz nagrodę państwową (rządową). Dzisiaj jego osiągnięcia zyskują światowy rozgłos.

**LITERATURA**

1. Śmiałowski M.: *Wodór w stali*. WNT. Warszawa 1962.
2. Marczak R.: *Tribologia w Polsce – zaranie i rozwój*. Tribologia nr 3/2007, s. 447.
3. Marczak R.: *Zjawisko Garkunowa*. Praca niepublikowana – referat wygłoszony na Zebraniu Naukowym KBM PAN, 1991.10.03.
4. *Niskotarciowe pokrycia roboczych powierzchni kinematycznych węzłów maszyn*. Projekt badawczy nr 7 70 70 9102. Kierownik – Marczak R.
5. *Praca zbiorowa. Materiały konferencyjne pt.: Problemy bezzużyciowego tarcia w maszynach*. WSI, Radom. 1993.
6. *Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego nr 7 70 9102*. WSI, Radom. 1994.
7. Białka Z., Kędziński K.: *Korektory do olejów smarowych*. Tribologia nr –6/97, s. 510.
8. Marczak R.: *Niskotarciowe dodatki do oleju a eksploatacyjna warstwa wierzchnia*. Tribologia nr 2/98, s. 131.
9. Guzik J., Maciąg A., Marczak R., Michalczewski R.: *Wpływ dyspersji tlenku miedzi w oleju na kształtowanie eksploatacyjnej warstwy wierzchniej oraz właściwości tribologiczne modelowych węzłów tarcia*. Tribologia nr 5/96, s. 561.
10. Ozimina D., Marczak R., Senatorski J.: *Tribologiczna kwalifikacja aktywnych powierzchniowo składników cieczy technologicznych*. Tribologia nr 5/96, s. 592.
11. Marczak R., Płaza S., Scholl H., Błaszczuk T.: *Badania tribologiczne na poziomie atomowym*. Tribologia 5–6/07, s. 439.
12. Burakowski T., Marczak R., Senatorski J., Marczak M.: *Znaczenie transformacji warstwy wierzchniej technologicznej w eksploatacyjną*. Tribologia nr 5–6/97, s. 477.
13. Kotnarowski A.: *Wpływ procesu tribologicznego przebiegającego w warunkach selektywnego przenoszenia na strukturę geometryczną powierzchni tarcia*. Tribologia nr 5–6/97, s. 696.
14. Marczak R., Ozimina D., Senatorski J., Scholl H.: *Ocena aktywności tribologicznej dodatków do smarów i cieczy technologicznych*. Tribologia nr 5–6/97, s. 765.
15. Szumniak J., Starczewski L.: *Dyfuzyjne przenoszenie materii do warstwy wierzchniej skojarzeń ciernych pracujących w podwyższonej temperaturze*. Tribologia nr 5–6/97, s. 935.
16. Kużarow A., Burłakowa W., Zadoszenko E., Małygina E., Kużarow A., Marczak R., Krawczyk K., Maciąg A., Scholl H., Flis J., Błaszczuk T.: *Formowanie warstw ochronnych na stali w samoorganizującym się układzie tribologicznym „miedź – gliceryna – stal”*. Tribologia nr 4/98, s. 517.
17. Wachal A.: *Krytyczna analiza procesu selektywnego przenoszenia*. Tribologia nr 5–6/97, s. 963.
18. Morozow D.: *Badania wpływu dodatków dyspersyjnych cząstek molibdenu i miedzi na tribologiczne własności cieczy smarująco-chłodzących*. Rozprawa doktorska. Wydział Mechaniczny PR. Radom 1999.