

METHOD OF IDENTIFICATION OF THE SLIDE TRIBOLOGICAL SYSTEM TOP LAYER CONDITION BY ASSESSMENT OF THE T-02 FOUR-BALL TESTER FRICTION NODE OPERATION

Piotr Bzura

Gdansk University of Technology
Narutowicza Street 11/12, 80-952 Gdańsk, Poland
tel.: +48583472573
e-mail: pbzura@pg.gda.pl

Abstract

A method is proposed of the assessment of T-02 four-ball tester friction node operation during extreme unit loads on the tribological system for identification of the top layer condition in that system lubricated with the tested lubricating oil.

By identification of the friction node with a thermodynamic system, that operation is treated as an energy generating process of the created servo-layer structure. The friction node operation assessment parameter at that stage is the friction energy needed for regeneration of the boundary layer, characterised by the time of return to friction in steady state conditions. According to such interpretation, the physical value carrying information on the capability of regeneration of the slide tribological system boundary layer is the friction node operation expressed in joule-seconds.

In particular, basic energy-influences of the friction node of the T-02 four-ball instrument on the stage of the boundary layer regeneration, the interpretation of the activity of the friction node at the boundary layer regeneration, method of research, the analysis of test results are presented in the paper

Keywords: servo-layer, operation, boundary layer regeneration.

METODA IDENTYFIKACJI STANU WARSTWY WIERZCHNIEJ ŚLIZGOWEGO UKŁADU TRIBOLOGICZNEGO NA PODSTAWIE OCENY DZIAŁANIA WĘZŁA TARCIA APARATU CZTEROKULOWEGO T-02

Streszczenie

Przedstawiono propozycję metody oceny działania węzła tarcia aparatu czterokulowego T-02 w czasie ekstremalnych obciążeń jednostkowych tego układu tribologicznego umożliwiającej identyfikację stanu warstwy wierzchniej układu smarowanego badanym olejem smarowym.

Poprzez utożsamienie węzła tarcia z systemem termodynamicznym działanie zostało potraktowane jako proces generowania energii struktury serwowarstewki powstałej podczas działania wspomnianego węzła tarcia. Parametrem oceny działania węzła tarcia na tym etapie jest praca tarcia potrzebna do regeneracji warstwy granicznej, którą charakteryzuje czas powrotu do tarcia w warunkach ustalonych. Według tej interpretacji wielkością fizyczną będącą nośnikiem informacji o możliwości regeneracji warstwy granicznej ślizgowych układów tribologicznych jest działanie węzła tarcia wyrażone w dżulosekundach.

W szczególności, podstawowe oddziaływania energetyczne węzła tarcia czterokulowego aparatu T-02 na etapie regeneracji warstwy granicznej, interpretacja działania węzła tarcia przy regeneracji warstwy granicznej, metodyka badań, analiza wyników badań są przedstawione w artykule.

Słowa kluczowe: serwowarstewka, działanie, regeneracja warstwy granicznej

1. Wstęp

Konieczność pracy łożysk ślizgowych w warunkach tarcia granicznego a w mikroobszarach także technicznie suchego (podczas rozruchu silnika spalinowego) i tarcia mieszanego lub płynnego (przy obciążeniu przy różnych prędkościach obrotowych) wymaga oddzielenia czopa

wał w warstwą oleju od jego panwi z materiału o małym współczynniku tarcia, nie wykazującego istotnych skłonności do tworzenia połączeń metalicznych przez filiację.

Panewka składa się z warstwy wierzchniej stopu łożyskowego związanego ze skorupą – wkładką z miękkiej stali, która zaciśnięta zostaje w gnieździe. Wybór doskonałego stopu łożyskowego tworzącego warstwę wierzchnią nie narażonego na zużycie losowe jest praktycznie niemożliwy, ponieważ [1]:

- panewka (tak jak jej gniazdo) odkształca się,
- wał ugina się,
- olej smarowy zanieczyszczany jest szybko produktami pochodzącymi ze spalania, a ponadto często znajdują się w nim twarde cząstki, olej napędowy i niekiedy woda,
- powierzchnie nie mogą być idealnie gładkie.

W związku z tym niezależnie od tego, z jakich rodzajów stopu łożyskowego zostanie zbudowana warstwa wierzchnia, nigdy nie da się wyeliminować zużycia. Obecnie około 85% awarii maszyn jest spowodowanych uszkodzeniami warstwy wierzchniej poszczególnych elementów [4] i dlatego należy opracować taką metodę identyfikacji stanu warstw wierzchnich, aby możliwe było rejestrowanie jak najmniejszego jej zużycia.

Do identyfikacji stanu warstwy wierzchniej proponuję zastosować metodę oceny działania węzła tarcia aparatu czterokulowego pracującego na etapie zużywania aż do zatarcia elementów współpracujących.

2. Podstawowe oddziaływania energetyczne węzła tarcia aparatu czterokulowego T-02 na etapie regeneracji warstwy granicznej

Węzeł tarcia, przedstawiony na Rys. 1a składa się z trzech unieruchomionych w uchwycie kul dolnych dociskanych z odpowiednią siłą do kulki górnej, zamocowanej we wrzecionie obracającym się z określoną prędkością. Można uznać ten węzeł jako system termodynamiczny [3, 4, 7]. Tworzą go trzę się elementy: wrzeciono ściślej kulka górna, obracające się i stykające się z trzema kulkami dolnymi w strefie kontaktu, którą jest serwowarstewka powstająca po przerwaniu warstwy granicznej oleju smarowego w wyniku regeneracji warstwy granicznej. Przyczyną wszelkich zachodzących przemian w systemie jest praca sił tarcia.

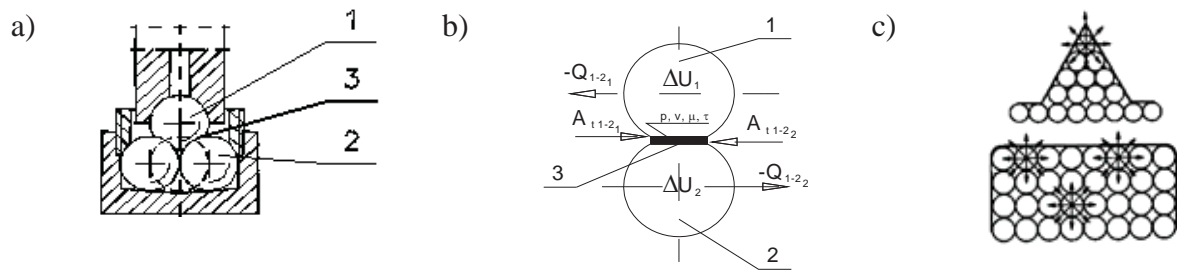
Na Rys.1b przedstawiono schemat doprowadzenia z otoczenia do systemu energii mechanicznej równoważnej pracy tarcia A_{t1-2} , która powoduje zwiększenie powierzchni styku o ΔA . Tarcia towarzyszy odprowadzanie ciepła do otoczenia Q_{1-2} i zmiana energii związanej ze strukturą ciała: wewnętrznej U i napięcia powierzchniowego σ . Równanie pierwszej zasady termodynamiki dla systemów otwartych na etapie regeneracji warstwy granicznej, uwzględniające przedstawione oddziaływania energetyczne ma następującą postać:

$$\Delta E_s = \Delta U - \sigma \cdot \Delta A = A_{t1-2} - Q_{1-2}. \quad (1)$$

W elementarnym polu styku z warstwą graniczną serwowarstewki wyróżniono parametry tribologiczne: nacisk jednostkowy p , prędkość poślizgu v , współczynnik tarcia kinetycznego μ i temperaturę t , których zmiany świadczą o przyroście energii struktury serwowarstewki.

Energia wewnętrzna jako składnik energii struktury serwowarstewki, jest również funkcją stanu jego warstwy wierzchniej. Głównymi składnikami energii wewnętrznej, które można wyróżnić przy tworzeniu serwowarstewki są [9]:

- energia kinetyczna ruchu postępowego (translacyjnego) i obrotowego (rotacyjnego) drobin,
- energia ruchu drgającego (oscylacyjnego) atomów w drobinie,
- energia potencjalna w polu wzajemnego przyciągania się drobin,
- energia chemiczna, związana z możliwością przebudowy drobin,
- energia stanów elektronowych w atomach i cząsteczkach.



Rys. 1. Węzeł tarcia aparatu czterokulowego jako termodynamiczny system otwarty: węzeł tarcia aparatu czterokulowego gdzie: 1-kulka górna, 2-kulki dolne, 3-serwowarstewka; schemat oddziaływań energetycznych przypisanych poszczególnym elementom węzła tarcia; model rozkładu energii wewnętrznej i energii swobodnej przypadającej na jednostkę pola powierzchni

Fig. 1. The four-ball tester friction node as an open thermodynamic system: a) the four-ball tester friction node, where: 1 - upper ball, 2 - lower balls, 3 - servo-layer; b) diagram of the energy interactions assigned to the individual friction node elements; c) distribution model of the internal energy and free energy per a unit of area

Drugim składnikiem energii struktury jest swobodna energia przypadająca na jednostkę pola powierzchni czyli napięcie powierzchniowe. W przypadku powierzchni stykających się kulek, na których atomy powierzchniowe mają ograniczoną swobodę ruchu, nie jest obojętne, w jakim stopniu atomy powierzchniowe są otoczone innymi atomami [4]. Jak wynika z Rys. 1c w im mniejszym stopniu atomy powierzchniowe są otoczone innymi atomami (tzn. ostra krawędź) tym większa jest wartość napięcia powierzchniowego.

3. Interpretacja działania węzła tarcia przy regeneracji warstwy granicznej

Działanie węzła tarcia aparatu czterokulowego polega na przetwarzaniu doprowadzonej energii w formie pracy tarcia na energię struktury serwowarstewki, ciepło odprowadzane do otoczenia i odprowadzanie energii wraz z produktami zużycia. Podczas regeneracji warstwy granicznej w węźle tarcia nie zachodzą zmiany masy więc nie występuje odprowadzanie energii wraz z produktami zużycia. Zwiększona wartość energii struktury serwowarstewki ΔE_S przetwarzana zostaje w procesie przenoszenia selektywnego, które prowadzi do wzmocnienia serwowarstewki. Wobec tego działania węzła tarcia w przedziale czasu regeneracji warstwy granicznej $[t_1, t_2]$ można interpretować następująco [5]:

$$D = \int_{t_1}^{t_2} E_S(t) dt, \quad (2)$$

gdzie:

D - działanie węzła tarcia,

$E_S(t)$ - energia struktury serwowarstewki umożliwiająca realizację regeneracji warstwy granicznej,

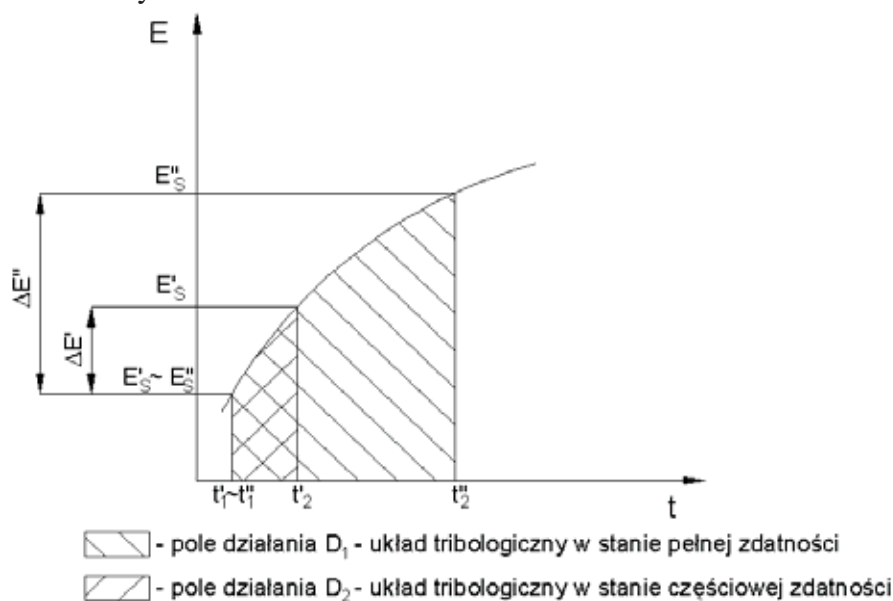
t - czas odtwarzania warstwy granicznej.

Zależność (2) odzwierciedla fizyczne walory działania węzła tarcia, ponieważ wynika z niej, że w przypadku, gdy działanie równe jest zeru nie nastąpi regeneracja węzła tarcia i ślizgowy układ tribologiczny nie może funkcjonować poprawnie, czyli nie powstanie serwowarstewka. Dodatkowo odzwierciedla również fakt, że działanie jako wielkość fizyczna ma skończoną wartość, gdyż wartość zarówno energii struktury serwowarstewki jak również czasu regeneracji warstwy granicznej nie może być nieograniczona.

Można przyjąć, że tak przedstawione działanie realizowane jest zgodnie z I zasadą termodynamiki, jeżeli nastąpi przyrównanie energii struktury serwowarstewki regeneracji warstwy granicznej do pracy tarcia pomniejszonej o ciepło odprowadzone do otoczenia. Wówczas wzór (2) określający działanie węzła tarcia przyjmie następującą postać:

$$D = \int_{t_1}^{t_2} (A_{t1-2} - Q_{1-2}) dt. \quad (3)$$

Tak przedstawione działania można, podobnie jak w pracy [5, 6] przedstawić w formie wykresu, na którym pole powierzchni odzwierciedla działanie warstwy wierzchniej ślizgowego układu tribologicznego. Na Rys. 2 przedstawiono przykład porównania działania warstwy wierzchniej ślizgowego układu tribologicznego znajdującego się w stanie pełnej i częściowej zdatności. Działanie to zostało określone na podstawie pomiarów węzła tarcia smarowanego różnymi olejami smarowymi.



Rys. 2. Przykładowy wykres porównawczy pól działania
 Fig. 2. Example of a comparative diagram of the operating fields

Z przedstawionego przykładu wynika, że: $D_1 > D_2$ a zatem na podstawie tak określonego działania warstwy wierzchniej ślizgowego układu tribologicznego można identyfikować stan warstwy wierzchniej pod względem ekstremalnych obciążeń.

4. Metodyka badań

Badania na węźle tarcia aparatu czterokulowego T-02 przeprowadzone zostały w czterech etapach na oleju smarowym Marinol RG1240 silnika 8S20UD-H.Cegielski-Sulzer:

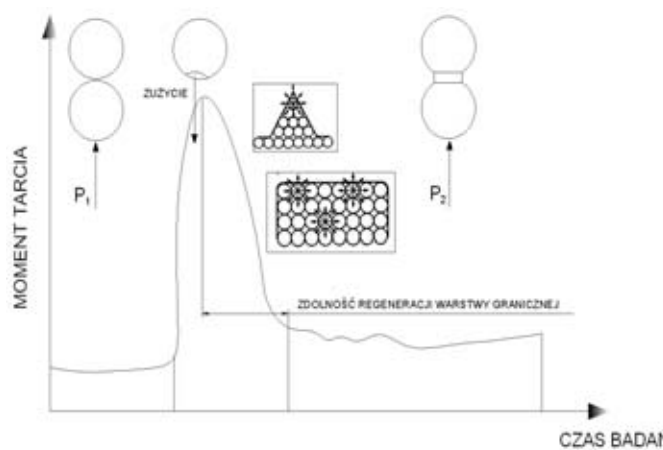
- w stanie czystym (olej nie był użyty do smarowania),
- olej eksploatowany,
- olej eksploatowany z zawartością 5% paliwa MDO, którym zasilany jest silnik,
- olej eksploatowany z zawartością 5% wody destylowanej.

W badaniach zostały przyjęte następujące parametry:

- prędkość obrotowa wrzeciona: 500 rpm,
- prędkość narastania obciążeń: 409 N/s,
- obciążenie początkowe: 0 N,
- obciążenie maksymalne: 7400 N,
- czas badania 18 s.

Węzeł tarcia stanowiły kulki łożyskowe, o średnicy 12,7 mm wykonane ze stali ŁH15 (stop żelaza Fe zawierający średnio 1% C, 0,02% S, 0,3% Ni, 0,3% Cu), w klasie dokładności 16 według normy PN-83/M-86452, zanurzone w badanym oleju smarowym.

Analizowane były wyniki pomiarów dotyczące zdolności warstwy wierzchniej wężła tarcia do regeneracji co przedstawia Rys. 3.



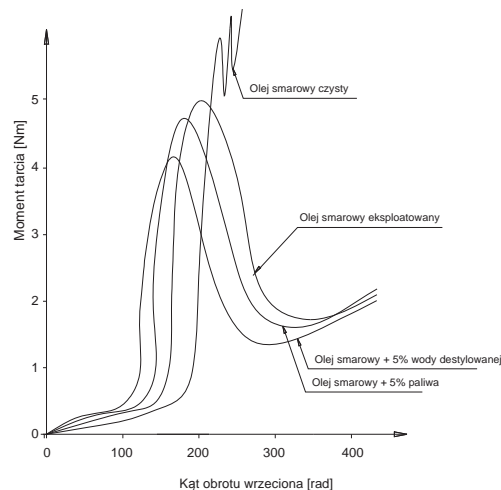
Rys. 3. Wpływ siły tarcia na regenerację warstwy granicznej
Fig. 3. Impact of the friction force on the boundary layer regeneration

Ze względu na brak możliwości pomiaru ciepła oddawanego do otoczenia oraz krótki czas pomiaru zdolności regeneracji warstwy granicznej przyjęto, że wartość Q_{1-2} można pominąć. W związku z tym działanie wężła tarcia określono za pomocą uproszczonego wzoru:

$$D = \int_{t_1}^{t_2} A_{t1-2} dt. \quad (4)$$

5. Analiza wyników badań

Wyniki badań dotyczące oceny wężła tarcia podczas regeneracji warstwy granicznej zostały przedstawione na ilustracjach graficznych na Rys. 4-5 i w Tab. 1.



Rys. 4. Krzywe momentu względem kąta obrotu wrzeciona wężła tarcia dla czterech różnych olejów smarowych
Fig. 4. The curves of moment towards the friction node spindle rotation angle with four different lubrication oils

Z Rys. 4 wynika, że dla oleju czystego nie nastąpiła regeneracja warstwy granicznej (tzn. nie powstała serwowarstewka), lecz doszło do zatarcia. W pozostałych przypadkach w wyniku selektywnego przenoszenia powstała serwowarstewka świadcząca o regeneracji warstwy granicznej wężła tarcia.

Podczas pracy wężła tarcia rozpatrywany jest moment tarcia, M_t umożliwiający określenie

zdolności regeneracyjnej warstwy granicznej. Proces regeneracji warstwy granicznej można potraktować jako pracę, którą określa następująca zależność:

$$A_{t1-2} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M_t d\varphi, \quad (5)$$

gdzie:

M_t - moment tarcia [Nm],

φ - kąt obrotu wrzeciona węzła tarcia [rad].

Pracę tarcia dla każdego przypadku wyznaczono na podstawie całkowania numerycznego metodą trapezów [2]. Dodatkowo na podstawie zależności $A_{t1-2}/\Delta\varphi$ został wyznaczony średni moment tarcia $M_{t\bar{s}r}$ umożliwiającą wyznaczenie działania wg następującej zależności:

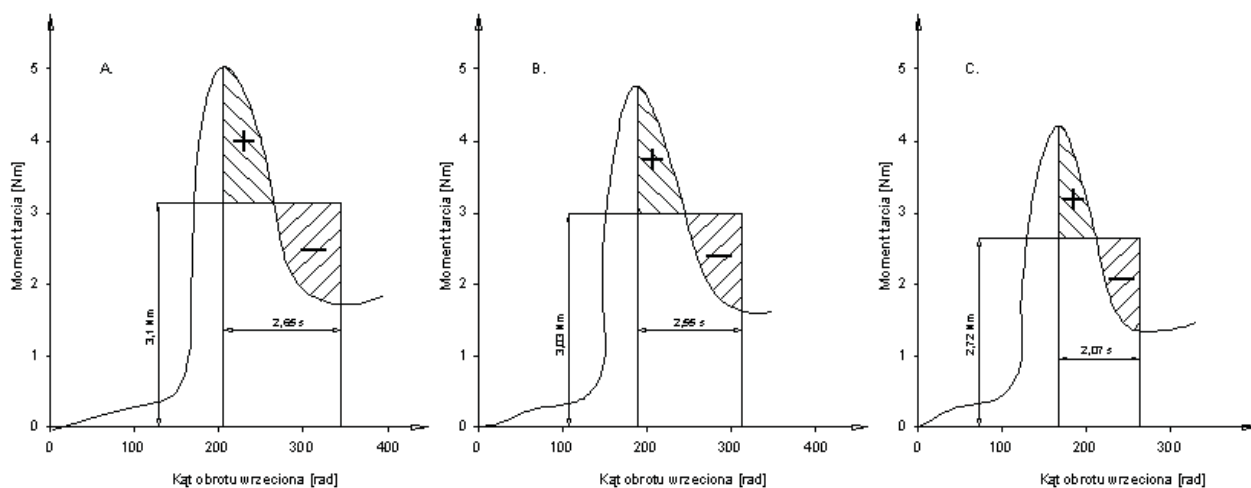
$$D = M_{t\bar{s}r} \cdot t_r, \quad (6)$$

gdzie:

t_r - czas odtwarzania warstwy granicznej [s],

$M_{t\bar{s}r}$ - średni moment tarcia [Nm].

Na Rys. 5 poprzez podanie przedziałów czasu regeneracji warstwy granicznej przedstawione zostały pola działania węzła tarcia w trzech etapach, w których powstała serwowarstewka. Wyniki badań zostały przedstawione w Tab. 1.



Rys. 5. Analiza wyników regeneracji warstwy granicznej: 5 A - regeneracja warstwy granicznej węzła tarcia z olejem smarowym eksploatowanym, 5 B - regeneracja warstwy granicznej węzła tarcia z olejem smarowym eksploatowanym + 5% paliwa MDO, 5 C - regeneracja warstwy granicznej węzła tarcia z olejem smarowym eksploatowanym + 5% wody destylowanej

Fig. 5. Analysis of the boundary layer regeneration results: 5 A - regeneration of the friction node boundary layer with the used lubrication oil, 5 B - regeneration of the friction node boundary layer with the used lubrication oil + 5% of the MDO fuel, 5 C - regeneration of the friction node boundary layer with the used lubrication oil + 5% of the distilled water

Tab. 1. Ocena działania węzła tarcia w czterech etapach badań
Tab. 1. Assessment of the friction node operation in the four investigation stages

| Nr próbki | | A_{t1-2} [J] | $M_{t\bar{s}r}$ [Nm] | t_r [s] | D [Js] |
|-----------|--|----------------|----------------------|-----------|--------|
| 1 | Olej czysty: pomiar przy 500 obr/min | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | Olej eksploatowany: pomiar przy 500 obr/min | 432,5 | 3,12 | 2,65 | 8,275 |
| 3 | Olej eksploatowany+5%MDO: pomiar przy 500 obr/min | 404,4 | 3,03 | 2,55 | 7,737 |
| 4 | Olej eksploatowany+5%H ₂ O: pomiar przy 500 obr/min | 294,2 | 2,72 | 2,07 | 5,631 |

Z obliczonych wartości działania wężła tarcia wynika, że warstwa wierzchnia układu tribologicznego, z którego została pobrana próbka nr 2 (wg Tab. 1) jest w najlepszym stanie technicznym, ponieważ działanie (D) tego wężła jest największe.

6. Uwagi końcowe i wnioski

Z przedstawionej analizy wyników badań wynika, że warto wprowadzić działanie wężła tarcia jako parametr określający stan warstwy wierzchniej istniejącej w ekstremalnych warunkach pracy. Na uwagę zasługuje fakt, że tak interpretowane działanie dotyczy górnej kulki wężła tarcia, która dotychczas uważana była za najmniej istotną.

Na działanie wężła tarcia podczas regeneracji warstwy granicznej bardzo istotnie wpływa zjawisko przenoszenia selektywnego, gdyż powstaje wówczas cienka plastyczna warstewka (serwowarstewka) umożliwiająca wygładzenie krawędzi a co za tym idzie osiągnięcie minimalnej wartości energii swobodnej przypadającej na jednostkę powierzchni, w wyniku czego wzrośnie energia struktury serwowarstewki.

Aby zwiększyć wiarygodność wyników badań na aparacie czterokulowym T-02 należy:

- pobierać próbki oleju smarowego z całego okresu eksploatacji silnika o ZS i stworzyć biografię wyników badań,
- warstwy wierzchnie kulek wężła tarcia maszyny czterokulowej zmodyfikować tak, aby swą budową odwzorowywały określone układy trybologiczne, co oznacza że warstwy wierzchnie kulki górnej powinny być podobne do warstw panwi,
- uwzględnić pominięte wartości energii odprowadzonej z wężła tarcia do otoczenia w formie ciepła,
- przeprowadzić takie badania w odniesieniu do rzeczywistych układów tribologicznych i porównać z tymi, które zostały uzyskane w badaniach wężła tribologicznego aparatu czterokulowego T-02.

Literatura

- [1] Brun, R., *Szybkobieżne silniki wysokoprężne*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1973.
- [2] Delventhal, K., Kissner, A., Kulik, M.: *Matematyka, Kompendium*, Świat książki, Warszawa 2005.
- [3] Bzura, P., *Analysis and assessment of the acoustic emission suitability for determination of the energy states of a tribological system in the form of a four-ball tester friction node*, Journal of Polish Cimac, Energetic Aspect, Gdańsk 2008.
- [4] Hebda, M., Wachal, A., *Trybologia*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1980.
- [5] Girtler, J., *Energetyczne aspekty diagnostyki maszyn*. DIAGNOSTYKA Nr 1(45), Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Warszawa 2008.
- [6] Girtler, J., *Metoda identyfikacji stanu technicznego urządzeń na podstawie oceny ich działania*, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Vol. 25, 2001.
- [7] Laber, S., Laber, A., *Modyfikowanie warunków pracy łożysk ślizgowych silników spalinowych niekonwencjonalnymi dodatkami smarnymi*, Materiały z Zebrania Plenarnego Sekcji Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN, s. 39-46, Zielona Góra 1998.
- [8] Sadowski, J., *Termodynamiczne aspekty procesów tribologicznych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 1997.
- [9] Szargut, J., *Termodynamika*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.

