

Remigiusz MICHALCZEWSKI*, **Marian SZCZEREK***,
Waldemar TUSZYŃSKI*, **Jan WULCZYŃSKI***

**APARAT CZTEROKULOWY DO BADANIA
WŁAŚCIWOŚCI PRZECIWZUŻYCIOWYCH,
PRZECIWZATARCIOWYCH I POWIERZCHNIOWEJ
TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ Z MOŻLIWOŚCIĄ
PODGRZEWANIA ŚRODKA SMAROWEGO**

**A FOUR-BALL MACHINE FOR TESTING
ANTIWEAR, EXTREME-PRESSURE PROPERTIES,
AND SURFACE FATIGUE LIFE WITH A POSSIBLILITY TO
INCREASE THE LUBRICANT TEMPERATURE**

Słowa kluczowe:

aparat czterokulowy, właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe, powierzchniowa trwałość zmęczeniowa, środki smarowe, materiały konstrukcyjne, wdrożenie, innowacyjność

Key-words:

Four-ball machine, antiwear (AW) and extreme-pressure (EP) properties, surface fatigue life, lubricants, engineering materials, implementation, know-how

* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy (ITeE – PIB), Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (048) 364-42-41.

Streszczenie

W artykule przedstawiono nowy aparat czterokulowy, opracowany w ramach zadania realizowanego w Programie Wieloletnim PW-004 pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”, którego Instytut Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu jest głównym realizatorem.

Podstawową różnicą między nowym aparatem czterokulowym a tego typu urządzeniami dotychczas wytwarzanymi w ITeE – PIB jest znaczące rozszerzenie jego możliwości badawczych. Dotychczas wytwarzany aparat czterokulowy, oznaczony symbolem T-02, pozwalał na badania właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych środków smarowych. Inny aparat czterokulowy, oznaczony symbolem T-03, umożliwiał badanie jedynie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Do tego oba aparaty nie pozwalały na badania w podwyższonej i kontrolowanej temperaturze. Nowy aparat, oznaczony symbolem T-02U, pozwala na realizację wszystkich wymienionych badań, zarówno dla środków smarowych, jak i materiałów konstrukcyjnych.

Zaprezentowano genezę tematu, budowę i charakterystykę techniczną nowego aparatu, realizowane metody badawcze, przedstawiono wybrane wyniki badań weryfikacyjnych, potencjalne obszary zastosowania oraz pierwsze wdrożenia.

WPROWADZENIE – GENEZA TEMATU

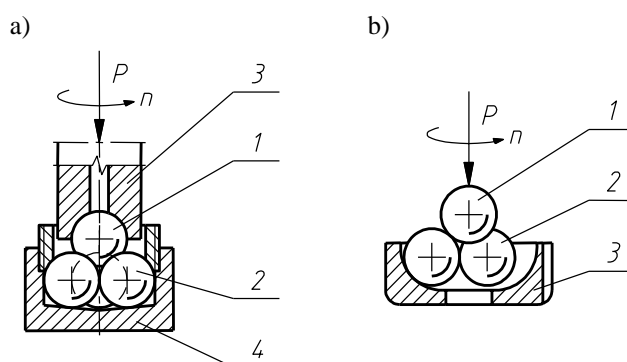
Aparat czterokulowy jest jednym z najbardziej popularnych i powszechnie wykorzystywanych urządzeń do badań tribologicznych, w szczególności środków smarowych. W przemyśle petrochemicznym używa się go np. do badania jakości samochodowych olejów przekładniowych do ręcznych skrzyń biegów. Niektóre przedsiębiorstwa (np. Amsoil, Lukoil, Naftochem, Orlen Oil) wręcz podają na swoich stronach internetowych dane reprezentatywne dla oferowanego oleju, otrzymane w badaniach za pomocą aparatu czterokulowego.

O popularności aparatu czterokulowego świadczą artykuły ukazujące się w najbardziej renomowanych, międzynarodowych czasopismach tribologicznych i tribochemicznych, autorstwa badaczy z różnych regionów świata. W ostatnich latach artykuły te dotyczą głównie badań ekologicznych (w tym nietoksycznych) środków smarowych [L. 1–4], a także nowej generacji dodatków smarnościowych [L. 5, 6], za pomocą aparatów

czterokulowych pracujących w styku ślizgowym. Spotyka się także, choć w znacznie mniejszej liczbie, artykuły dotyczące badań za pomocą aparatów czterokulowych pracujących w styku tocznym [L. 7, 8]. Ostatnio odnotowuje się zastosowanie aparatu czterokulowego do badania nie tylko środków smarowych, ale także nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, np. cienkich, twardych powłok przeciwzużyciowych; wymienić tu można np. prace badaczy z ITeE – PIB [L. 9].

Instytut Technologii Eksploatacji – PIB (ITeE – PIB) w Radomiu jest największym w kraju i coraz szerzej znanym za granicą producentem aparatury (testerów) do badań tribologicznych. Posiada w ofercie ok. 25 różnych typów aparatów wytwarzanych dla odbiorców z sektora przemysłowego oraz badawczo-rozwojowego. Do tej pory wdrożono blisko 160 urządzeń, z czego 20 poza granicami kraju (Chiny, Czechy, Izrael, Korea Płd., Meksyk, Niemcy, Rosja, Węgry, Wietnam, USA).

W ofercie ITeE – PIB znajdują się dwa typy aparatów czterokulowych, o symbolach T-02 i T-03. Pierwszy służy do badania właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych w styku ślizgowym – **Rys. 1 a**. Drugi przeznaczony jest do badania powierzchniowego zużycia zmęczeniowego (ang. *pitting*) w styku tocznym – **Rys. 1b**. O dużym zainteresowaniu rynku tego typu aparaturą świadczy łączna liczba wdrożeń obu aparatów, wynosząca blisko 40.



Rys. 1. Schematy czterokulowego testowego węzła tarcia w dwóch wariantach: a) styk ślizgowy (1 – górna kulka, 2 – dolne kulki, 3, 4 – uchwyty), b) styk toczny (1 – górna kulka, 2 – dolne kulki, 3 – bieżnia); możliwe jest zastosowanie stożka zamiast kulki górnej

Fig. 1. Schemes of four-ball tribosystem in two versions: a) sliding contact (1 – top ball, 2 – bottom balls, 3, 4 – ball holders), b) rolling contact (1 – top ball, 2 – bottom balls, 3 – race); it is possible to use a test cone instead of the top ball

Pomimo dużego zainteresowania dotychczasowymi aparatami czterokulowymi zwrócono uwagę na fakt, że niemal wszystkie wdrożenia miały miejsce na rynku krajowym. W celu rozszerzenia sprzedaży na rynki zagraniczne dokonano identyfikacji dodatkowych wymagań, które powinny zostać spełnione. Są to:

- wprowadzenie możliwości realizacji procedur opisanych w uznanych na świecie normach ASTM D 4172 i ASTM D 2266 dotyczących badania właściwości przeciwzużyciowych w podwyższonej temperaturze (75°C),
- umożliwienie wyznaczania współczynnika tarcia w podwyższonej temperaturze (75°C) według procedury opisanej w normie ASTM D 5183,
- wprowadzenie możliwości realizacji procedury opisanej w brytyjskiej normie IP 300 w zakresie badania pittingu w podwyższonej temperaturze (norma IP 300 nie precyzuje wymaganego poziomu temperatury),
- umożliwienie kompleksowego wykonania wszystkich wspomnianych badań (zużycie, zacieranie, pitting, zarówno w temperaturze pokojowej, jak i podwyższonej) za pomocą jednego urządzenia.

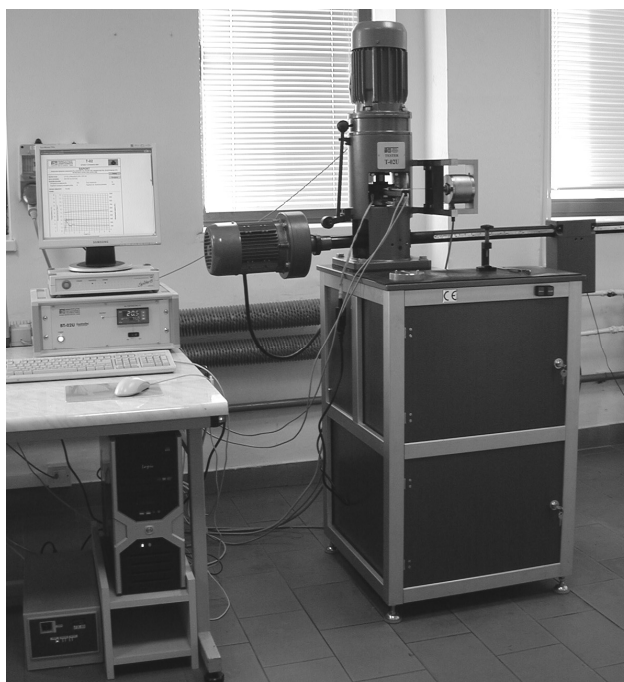
Poprawa charakterystyki technicznej, a przy tym dorównanie ofercie firm konkurencyjnych, wymagała opracowania nowego, znacznie bardziej uniwersalnego aparatu czterokulowego, który służyłby do badania zarówno właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych, jak i powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, dodatkowo z możliwością podgrzewania środka smarowego. W tym celu zrealizowano projekt badawczy zamawiany nr PW-004/ITE/09/2005 w ramach Programu Wieloletniego PW-004 (prace zakończono w 2007 r.). Opracowane urządzenie oznaczono symbolem T-02U (*U* – *uniwersalny*) i włączono do opracowanego w Zakładzie Tribologii ITeE – PIB Systemu Badań Tribologicznych [L. 10].

BUDOWA APARATU T-02U

Zdjęcie nowego aparatu czterokulowego T-02U wraz z systemem pomiarowo-sterującym pokazano na **Rys. 2**.

Sterowanie urządzeniem i pomiary odbywają się za pomocą:

- zintegrowanego sterownika oznaczonego symbolem BT-02U – **Rys. 3**,
- sterownika silników asynchronicznych,
- wzmacniacza pomiarowego z podłączonymi doń przetwornikami pomiarowymi,
- komputera i programu pomiarowo-sterującego.



Rys. 2. Zdjęcie nowego aparatu czterokulowego T-02U

Fig. 2. Photograph of the new T-02U four-ball machine



Rys. 3. Fotografia zintegrowanego sterownika BT-02U

Fig. 3. Photograph of the BT-02U integrated controller

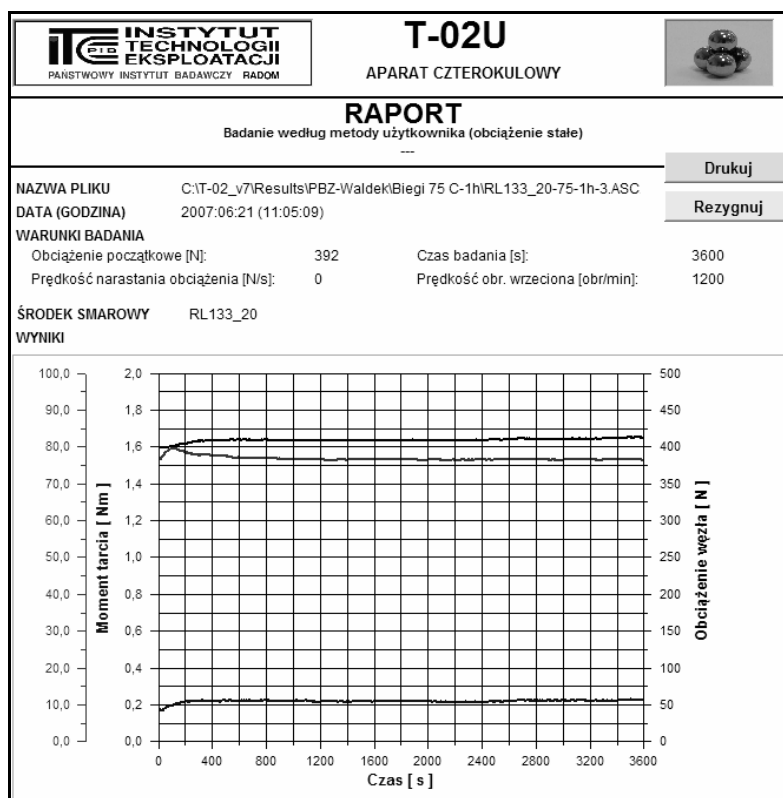
Sterownik BT-02U oraz program komputerowy zostały opracowane w ITeE – PIB.

Zintegrowany sterownik BT-02U zawiera układy do kontroli temperatury węzła tarcia oraz monitoringu drgań. Dla osiągnięcia odpowiedniej stabilizacji temperatury wykorzystano regulator PID (proporcjonalno-

-całkująco-różniczkujący). Pozwala on na osiągnięcie temperatury zadanej bez przegrzewania środka smarowego.

Sterownik silników asynchronicznych daje możliwość bezstopniowego zadawania prędkości obrotowej wrzeciona aparatu w szerokim zakresie. Umożliwia programowanie charakterystyki napięciowo-częstotliwościowej (U/f), tak aby po osiągnięciu żądanego momentu tarcia silnik zatrzymał się automatycznie. Zabezpiecza to uchwyt górnej kulki przed przeciążeniami, które mogą prowadzić do jego uszkodzenia.

W czasie badań właściwości przeciwwzrostowych i przeciwwzatarciowych mierzony jest moment tarcia, obciążenie węzła tarcia oraz temperatura środka smarowego za pomocą przetworników pomiarowych podłączonych do wzmacniacza. Wyniki są wyświetlane na ekranie i zapisywane na twardym dysku. Pozwala to po zakończeniu biegu badawczego na ich wydruk w postaci raportów – Rys. 4.

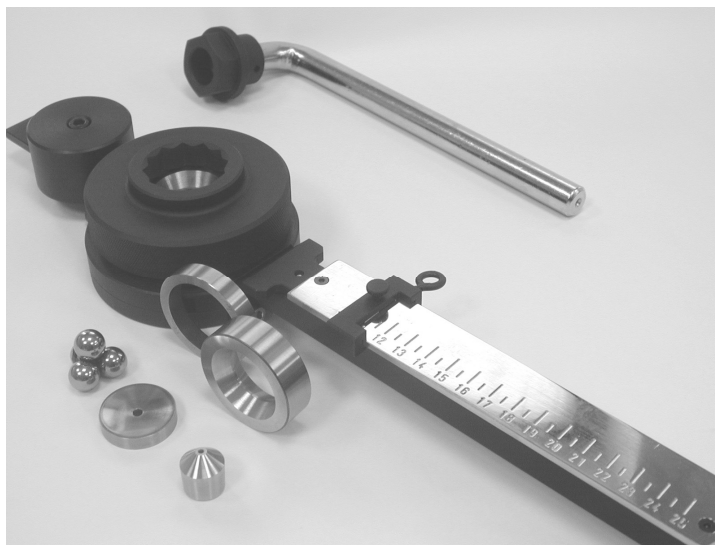


Rys. 4. Widok ekranu z raportem z badań

Fig. 4. Window with report display

W czasie badań pittingu mierzona jest dodatkowo amplituda drgań. Z chwilą przekroczenia przez węzeł tarcia zadanego poziomu (wskutek powstania na elementach testowych wykruszenia zmęczeniowego) silnik napędowy aparatu jest automatycznie wyłączany. Drgania monitorowane są za pomocą akcelerometru podłączonego do sterownika BT-02U, a wyniki podawane są na ekranie w postaci graficznej.

Do mocowania elementów testowych służy specjalny uchwyt pokazany na **Rys. 5**.



Rys. 5. Fotografia uchwytu elementów testowych wraz z akcesoriami

Fig. 5. Photograph of the test balls holder with necessary accessories

Uchwyt stanowi zupełnie nowe rozwiązanie w stosunku do używanych w dotychczasowych aparatach czterokulowych. Pozwala na mocowanie elementów testowych albo dla realizacji ruchu ślizgowego (badanie właściwości przeciwzuzyciowych i przeciwzatarciowych), albo ruchu tocznego (badanie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej). Umożliwia także podgrzewanie i kontrolę temperatury badanego środka smarowego.

CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA APARATU T-02U I REALIZOWANE METODY BADAWCZE

Specyfikacja techniczna nowego aparatu podana jest w **Tab. 1**.

Tab. 1. Specyfikacja techniczna aparatu T-02U

Tab. 1. Technical specifications of the T-02U machine

Rodzaj ruchu	Ślizgowy lub toczny
Geometria styku	Punktowy
Testowy węzeł tarcia	Cztery kule lub stożek–kule
Średnica kulek testowych	1/2"
Rodzaj badanego materiału	Środki smarowe oraz materiały konstrukcyjne (po zamianie górnej kulki na stożek)
Temperatura węzła tarcia	Stabilizowana od temperatury otoczenia do 75°C z dokładnością $\pm 2^\circ\text{C}$; możliwość uzyskania temperatury do 175°C
Prędkość obrotowa wrzeciona	Zmieniana w sposób bezstopniowy od 300 do 1800 obr./min
Obciążenie styku	Zmieniane w sposób bezstopniowy od 0 do 7850 N za pomocą układu dźwigniowego z przesuwnym obciążnikiem
Mierzone wielkości	Temperatura węzła tarcia, obciążenie, opory ruchu, prędkość obrotowa, amplituda drgań, czas
Napęd wrzeciona i obciążnika	Silniki asynchroniczne
Pobór mocy	Ok. 2 kW
Zasilanie	230 V / 50 Hz

Aparat T-02U pozwala na realizację następujących metod badawczych:

- znormalizowanych: PN-76/C-04147, PN-EN ISO 20623, ASTM D 2783, ASTM D 2596, ASTM D 4172, ASTM D 2266, IP 239, DIN 51350, ASTM D 5183, IP 300,
- własnych, opracowanych w ITeE – PIB: metody badania właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych w układzie czterokulowym [L. 11–14], metody badania właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych lub materiałów konstrukcyjnych w układzie stożek–kule [L. 15] oraz metody badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej dla środków smarowych lub materiałów konstrukcyjnych [L. 16].

WYBRANE WYNIKI BADAŃ WERYFIKACYJNYCH I ICH ANALIZA

Przed dopuszczeniem do eksploatacji dokonano serii badań weryfikacyjnych aparatu T-02U. Skoncentrowano się głównie na:

- bezpieczeństwa pracy użytkownika (izolacje elektryczne, termiczne),
- poprawności uzyskiwanych wyników w zakresie badania właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych,
- poprawności uzyskiwanych wyników w zakresie badania pittingu,
- osiągnięciu odpowiedniej stabilizacji kontrolowanych parametrów pracy,
- znacznej redukcji zakłóceń elektromagnetycznych poprzez ekranowanie przewodów zasilających i postumentu urządzenia; było to niezbędne do nadania znaku CE.

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki badań weryfikacyjnych.

Badania właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych

W celu sprawdzenia poprawności oznaczania właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych dokonano porównania (w tzw. warunkach odtwarzalności) wyników uzyskanych za pomocą aparatu T-02U do wyników uzyskanych identycznymi metodami w laboratoriach akredytowanych przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA) – **Tab. 2**. Uzyskane różnice porównano do wartości dopuszczalnych, czyli tzw. różnic krytycznych wyznaczanych według normy PN-ISO 5725:2002, dla poziomu prawdopodobieństwa 95%, na podstawie znanych wartości powtarzalności i odtwarzalności oraz przyjętej w badaniach liczby powtórzeń. Zbadano olej referencyjny CEC RL 133, zbliżony składem do olejów silnikowych.

Na podstawie danych podanych w **Tab. 2** stwierdzono zgodność wyników uzyskanych za pomocą aparatu T-02U oraz aparatów czterokulowych w laboratoriach akredytowanych przez PCA, co świadczy o poprawności działania opracowanego aparatu czterokulowego. Weryfikacji nie poddano jedynie wyznaczania średniej średnicy śladów zużycia w temp. 75°C według norm ASTM D 4172 i D 2266, ponieważ w kraju brak jest akredytowanych laboratoriów stosujących tę metodę.

Badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej

W celu weryfikacji poprawności działania aparatu T-02U w warunkach styku tocznego wyznaczono rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej W definiowany w literaturze [L. 17] jako stosunek trwałości 90% (L_{90}) do trwałości 10% (L_{10}). Uzyskane wartości rozrzutu porównano do osiąganych za pomocą innych aparatów do badania pittingu.

Przykładowe wyniki podano w **Tab. 3**. Zbadano dwa oleje referencyjne CEC RL 144 (mineralny olej bazowy) oraz CEC RL 181 (olej zbliżony składem do przekładniowych), przy czym ten ostatni zbadano także w podwyższonej i kontrolowanej temperaturze (90°C).

Tab. 2. Porównanie wyników uzyskanych za pomocą aparatu T-02U z wynikami uzyskanymi w laboratoriach akredytowanych przez PCA (laboratorium instytutu zewnętrznego oraz laboratorium własne)

Tab. 2. Comparison of results obtained using T-02U machine with the ones obtained in laboratories accredited by PCA (external and own labs)

Lp.	Wskaźnik / norma lub metoda	Różnica wyników	Różnica krytyczna (dopuszczalna)	Werdykt	Uwagi
1	Średnia średnica śladów zużycia w temp. pokojowej d_{sr} [mm] na podst. PN-76/C-04147 przy $t = 3600$ s i $P = 392$ N	0,11	0,16	Wyniki zgodne	Porównanie z laboratorium zewnętrznym
2	Wskaźnik zużycia pod obciążeniem I_h [daN] PN-76/C-04147	3	13	Wyniki zgodne	Porównanie z laboratorium zewnętrznym
3	Obciążenie zespawania P_z [daN] PN-76/C-04147	0 (stopni obciążenia)	1 (stopień obciążenia)	Wyniki zgodne	Porównanie z laboratorium zewnętrznym
4	Obciążenie zacierające P_t [N] PN-76/C-04147	33	283	Wyniki zgodne	Porównanie z wynikami z aparatu T-02 w laboratorium własnym
5	Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} [N/mm ²] metoda własna	36	239	Wyniki zgodne	Porównanie z wynikami z aparatu T-02 w laboratorium własnym

Tab. 3. Rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej W uzyskany dla różnych olejów za pomocą aparatu T-02U

Tab. 3. Ratio of the surface fatigue life (W) for different oils tested using T-02U machine

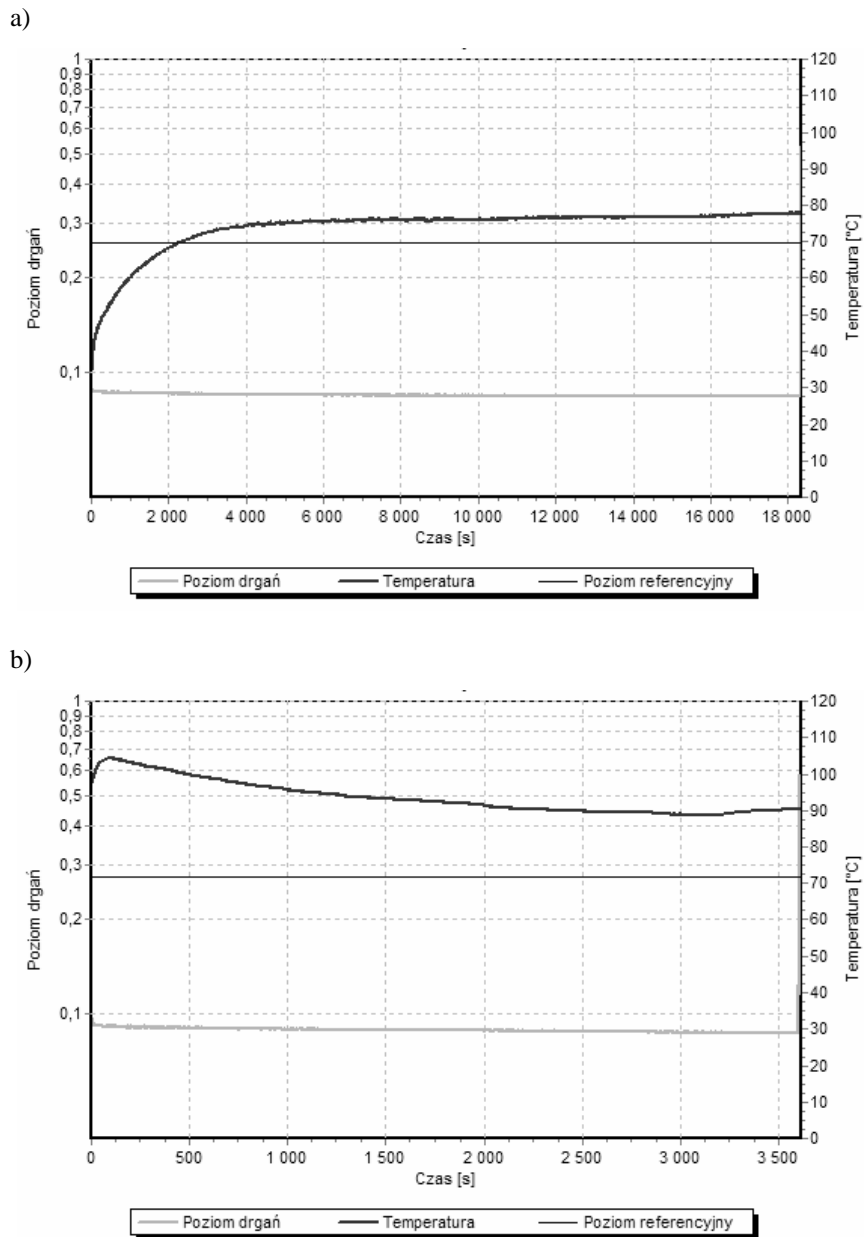
Wskaźnik	Wynik badania – olej CEC RL 144	Wynik badania – olej CEC RL 181	Wynik badania – olej CEC RL 181; $T = 90^{\circ}\text{C}$
L_{10} [min]	93	115	17
L_{90} [min]	248	196	85
$W = L_{90} / L_{10}$	2,7	1,7	5

Z **Tab. 3** zaobserwować można, że maksymalny rozrzut powierzchniowej trwałości zmęczeniowej W uzyskany za pomocą nowego aparatu nie przekracza wartości 5, tj. średniego rozrzutu uzyskiwanego za pomocą dotychczas stosowanych aparatów do badania pittingu (T-03). Świadczy to o poprawności wyników uzyskiwanych za pomocą aparatu T-02U w warunkach styku tocznego.

Przebiegi temperatury badanego oleju (oraz poziomu drgań) w czasie badań pittingu pokazano na **Rys. 6**.

Na **Rys. 6** zaobserwować można, że przy badaniach w temperaturze podniesionej do 90°C temperatura oleju praktycznie nie spadała poniżej zadanej wartości (**Rys. 6b**), podczas gdy w badaniach zaczynających się w temperaturze pokojowej narastała i dopiero po pewnym czasie dochodziła do stanu równowagi (ok. 80°C – **Rys. 6a**).

Wysoka temperatura w ciągu całego biegu dla testów w podniesionej temperaturze spowodowała obniżenie lepkości oleju, a przez to grubości filmu smarowego, co prowadziło do częstszego kontaktu mikronierówności powierzchni, a w konsekwencji przyczyniło się do znaczącego spadku powierzchniowej trwałości zmęczeniowej (**Tab. 3**). Podczas badań niekorzystny proces zmniejszania lepkości oleju następował powoli, dlatego uzyskany czas do wystąpienia pittingu był znacznie dłuższy. Uzyskany efekt spadku trwałości zmęczeniowej jest efektem spodziewanym, co dodatkowo wskazuje na poprawność otrzymanych za pomocą aparatu T-02U wyników badań.



Rys. 6. Przebieg temperatury oleju CEC RL 181 w czasie badań pittingu: a) badania rozpoczęte w temperaturze pokojowej, b) badania w temperaturze podwyższonej do 90°C

Fig. 6. CEC RL 181 oil temperature during pitting tests: a) run started at room temperature, b) run carried out at elevated temperature (90°C)

PODSUMOWANIE

Potencjalne obszary aplikacji

Nowy aparat czterokulowy, oznaczony symbolem T-02U, pozwala na wykonywanie badań właściwości przeciwzużyciowych, przeciwzatarciowych i powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, także w podwyższonej i kontrolowanej temperaturze. Służy zarówno do badania środków smarowych, jak i materiałów konstrukcyjnych, według metod znormalizowanych oraz własnych (opracowanych w ITeE – PIB).

Wykorzystanie opracowanej aparatury dotyczy nauk technicznych, szczególnie tribologii, tribochemii, chemii organicznej, materiałoznawstwa, inżynierii materiałowej, inżynierii powierzchni, głównie w obszarze:

- badania i certyfikacji środków smarowych, włączając w to środki o stałej konsystencji w temperaturze pokojowej, które przed biegiem badawczym wymagają podgrzania dla uzyskania stanu płynnego (np. specjalne woski stosowane przy tłoczeniu),
- badania materiałów konstrukcyjnych przeznaczonych na węzły tarcia,
- badania zjawisk zachodzących w strukturach materiałów współpracujących tarcioowo.

Pierwsze wdrożenia

Do chwili złożenia niniejszego artykułu dokonano 5 wdrożeń – do przemysłu petrochemicznego (rafinerie), laboratorium jednostki b-r, jednostki wojskowej i wyższej uczelni technicznej. Docelowo aparat czterokulowy T-02U może znaleźć zastosowanie także w laboratoriach sektora małych i średnich przedsiębiorstw zajmujących się wytwarzaniem środków smarowych. Prognozowany jest eksport. Pozwoli na to blisko 2-krotnie niższa cena w porównaniu z konkurencją przy podobnej jakości i charakterystyce technicznej.

Już pierwsze wdrożenia pozwoliły na uzyskanie przychodu o wartości kilkukrotnie przekraczającej budżet projektu. Świadczy to o trafności podjętego w projekcie tematu. Sytuacja ta ukazuje jednocześnie zasadność inwestowania środków budżetowych w rozwój polskiego *know-how*.

LITERATURA

1. Kajdas C., Majzner M.: Effectiveness of selected CHO compounds as antiwear additives to white mineral oils. *Tribology Transactions*. 2005, t. 48, s. 93–99.
2. Jayadas, N.H., Prabhakaran Nair K., Ajithkumar G.: Tribological evaluation of coconut oil as an environment-friendly lubricant. *Tribology International*. 2007, t. 40, s. 350–354.
3. Zeng X., Li J., Wu X., Ren T., Liu W.: The tribological behaviors of hydroxyl-containing dithiocarbamate-triazine derivatives as additives in rapeseed oil. *Tribology International*. 2007, t. 40, s. 560–566.
4. Sharma Brajendra K., Adhvaryu A., Erhan Sevim Z.: Friction and wear behavior of thioether hydroxy vegetable oil. *Tribology International*. 2009, t. 42, s. 353–358.
5. Sułek M.W., Bocho-Janiszewska A.: The effect of metal 8-hydroxyquinolates as lubricant additives on the friction process. *Tribology Letters*. 2003, t. 15, s. 301–307.
6. Rico E. Fernández, Minondo I., Cuervo D. García: The effectiveness of PTFE nanoparticle powder as an EP additive to mineral base oils. *Wear*. 2007, t. 262, s. 1399–1406.
7. Tuszyński W., Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M.: Effect of ageing automotive gear oils on scuffing and pitting. *Tribology International*. 2008, t. 41, s. 875–888.
8. Rico E. Fernández, Minondo I., Cuervo D. García: Rolling contact fatigue life of AISI 52100 steel balls with mineral and synthetic polyester lubricants with PTFE nanoparticle powder as an additive. *Wear*. 2009, t. 266, s. 671–677.
9. Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: The lubricant – coating interaction in rolling and sliding contacts. *Tribology International*. 2009, t. 42, s. 554–560.
10. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITeE, Radom 1997.
11. Szczerek M., Tuszyński W.: *Badania tribologiczne. Zacieranie*. Wyd. ITeE, Radom 2000.
12. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. *Wear*. 2001, t. 249, s. 188–193.
13. Szczerek M., Tuszyński W.: A method for testing lubricants under conditions of scuffing. Part I. Presentation of the method. *Tribotest journal*. 2002, t. 8, nr 4, s. 273–284.
14. Burakowski T., Szczerek M., Tuszyński W.: Scuffing and seizure – characterization and investigation. Rozdział 6 pracy zbiorowej (red. Totten G.E., Liang H.): *Mechanical Tribology. Materials, characterization, and applications*. Wyd. Marcel Dekker, Inc. (USA), New York – Basel 2004.

15. Michalczewski R., Szczerek M., Tuszyński W., Wulczyński J.: Nowa metoda wyznaczania właściwości przeciwzatarciowych materiałów konstrukcyjnych i środków smarowych. ZEM. 2006, z. 3, s. 53–66.
16. Michalczewski R., Piekoszewski W.: The method for assessment of rolling contact fatigue of PVD/CVD coated elements in lubricated contacts. Tribologia. Finish Journal of Tribology. 2006, t. 25, s. 34–43.
17. Libera M., Piekoszewski W., Waligóra W.: The influence of operational conditions of rolling bearings elements on surface fatigue scatter. Tribologia. 2005, nr 3, s. 205–215.

Recenzent:
Włodzimierz WALIGÓRA

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Informatyzacji, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008.

Summary

The authors present a new four-ball machine developed within the scope of the Multi-Year Programme PW-004 “Development of innovative systems of manufacturing and maintenance 2004–2008”, coordinated by the Institute for Sustainable Technologies – National Research Institute in Radom.

The main difference between the new device and the ones having been manufactured by ITeE – PIB so far is related to a significant improvement of the research capabilities. The previously manufactured four-ball machine, known as T-02 tribotester, was intended for testing antiwear (AW) and extreme-pressure (EP) properties of lubricants. Another four-ball tribotester, denoted as T-03, was intended only for determination of the surface fatigue life. Neither T-02, nor T-03 machine made it possible to perform runs at an increased and controlled lubricant temperature. The new machine, denoted as T-02U, enables the user to perform all the mentioned tests, both for lubricants and engineering materials.

A genesis of the idea of the new four-ball machine, its main units, technical specifications, realized test methods, chosen results of verification testing, potential areas of application, as well as first implementations in industrial and scientific laboratories, are presented.