

Wojciech ŻUROWSKI<sup>1</sup>

### **BADANIA ODPORNOŚCI TRIBOLOGICZNEJ UKŁADÓW METALI NA ZUŻYWANIE TRIBOLOGICZNE NA MASZYNI TT-03**

*W pracy przedstawiono stanowisko badawcze typu trzpień-tarcza do badań maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne. Stanowisko wykorzystuje nowo opracowany tester typu TT-03 wyprodukowany w Instytucie Budowy Maszyn Politechniki Radomskiej. Opisano konstrukcję testera oraz podano zakres wykonywanych badań tribologicznych. Podano także przykładowe wyniki pomiarów.*

### **INVESTIGATIONS OF THE TRIBOLOGY RESISTANCE OF COUPLES OF METALS ON THE TRIBOLOGY WASTE BY MACHINE TT-3**

*On the job one introduced the exploratory position of the type pin-shield to research of the maximum resistance on the tribology waste. The position uses the newly worked out tester of the type TT-03 made in the Institute of Machine Building of the Technical University of Radom. One circumscribed the construction of the tester and one gave the range of performed tribology research. One gave also of example of the result of measurement.*

#### **1. WPROWADZENIE**

Badania odporności na zużywanie opierają się na analizie przemian termodynamicznych zachodzących w systemie termodynamicznym otwartym. Celem jest stwierdzenie w jakich warunkach układ uzyskuje największą odporność. Rozważając proces tarcia, zużywania oraz problem odporności na zużywanie na makroskopowym poziomie organizacji materii, przyjmujemy za podstawę równanie bilansu energii. Podejście fenomenologiczne prowadzi do opisu analitycznego odporności na zużywanie, gdzie nie uwzględnia się budowy i właściwości mikroskopowych materii. W doświadczeniach prowadzonych zgodnie z podejściem fenomenologicznym parametrami zadawanymi są: obciążenie, współczynnik tarcia i temperatura w strefie tarcia.

#### **2. BADANIA TRIBOLOGICZNE Z WYKORZYSTANIEM TESTERA TT-3**

Liczne badania tribologiczne przeprowadzone przez wielu autorów dowiodły, w tym również najnowsze [1] wskazują, że tradycyjnie zakłada się, że na przebieg tarcia i zużycia elementów oprócz zadawanych parametrów pracy węzła tarcia (obciążenie, prędkość

---

<sup>1</sup>Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, Radom 26-600; Krasickiego 54. E-mail: wzurow@pr.radom.pl

poślizgu, droga tarcia), występują również niekontrolowane (np. drgania maszyny) oraz istnieje również duży wpływ otoczenia (wilgotności, rodzaj medium otaczającego, próżni oraz temperatury). Takie podejście nie pod uwagę możliwości stabilizacji np. temperatury w strefie tarcia oraz samego współczynnika tarcia, który może być dość precyzyjnie kontrolowany i stabilizowany.

Przyjęcie stabilizacji temperatury strefy tarcia i współczynnika tarcia pozwala na określenie dla danego układu ciernego największej odporności definiowanej jako praca właściwa zużycia dla układu. W tym przypadku praca właściwa zużycia jest ilorazem pracy tarcia i zużycia masowego układu (czyli obu elementów). Pozostałe parametry procesu tarcia tj. nacisk, prędkość poślizgu i droga tarcia mogą być ustalone dowolnie. Możliwe jest, dzięki temu, ustalenie optymalnych parametrów tarcia. Takich, że odporność układu osiąga maksimum, lub zbliża się do niego.

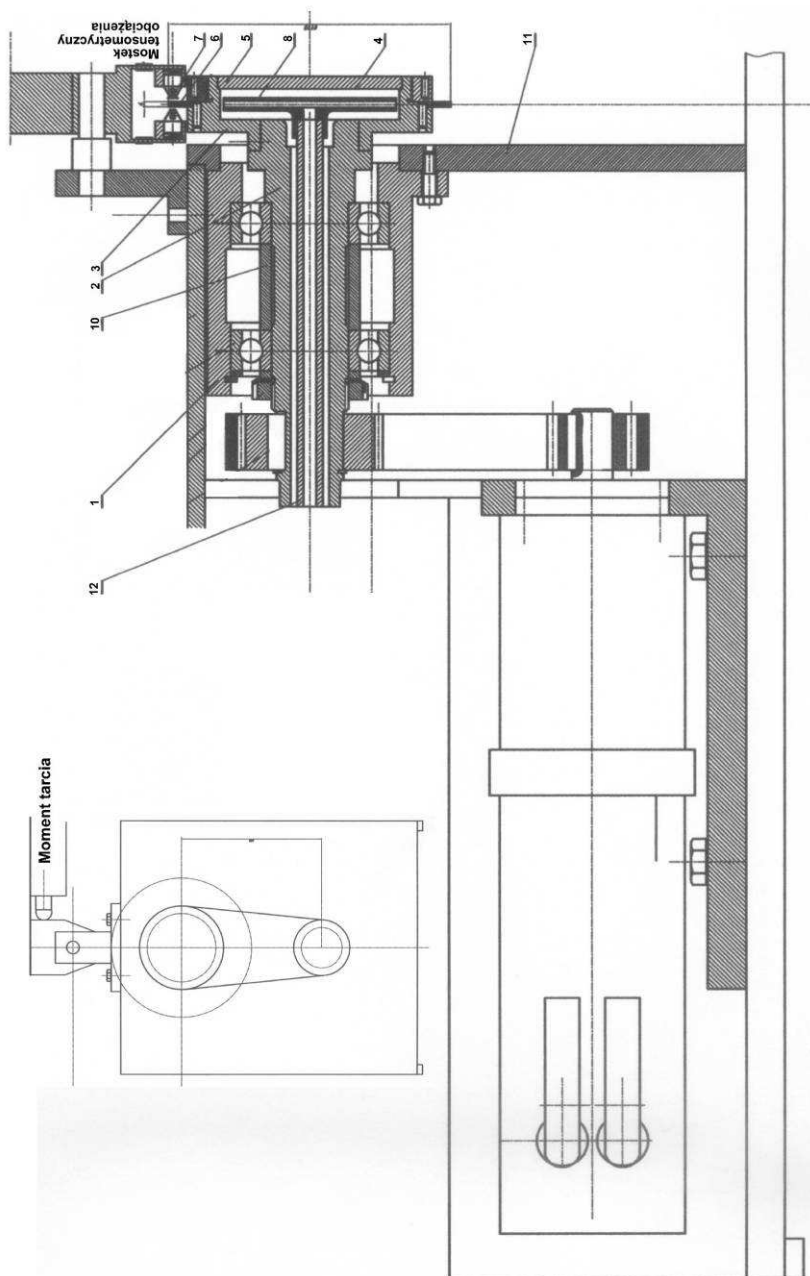
Temperatura otoczenia węzła tarcia wpływa na właściwości fizyczne i wytrzymałościowe materiałów trących [2] oraz na tworzenie tlenkowych struktur wtórnych [3,4,5], co również znajduje odzwierciedlenie w charakterystykach tarciovych i zużyciu elementów trących.

Dane zawarte w katalogach materiałowych, dotyczące właściwości tribologicznych materiałów najczęściej nie podają zakresu temperatur w jakich zostały ustalone, a podawane są najczęściej dla warunków temperatur dodatnich. W niskich temperaturach właściwości te mogą ulec radykalnym zmianom [6]. Nie można więc tych danych wykorzystać w przypadku materiałów na pary trące przeznaczone do pracy w niskich temperaturach.

Z praktyki inżynierskiej wiadomo, że problem trwałości węzłów tarciovych w niskich (poniżej 0°C) temperaturach nie jest rozwiązany. Przy pracy węzła tarcia w niskiej temperaturze najczęściej nie można stosować smarów w postaci olejów lub smarów plastycznych ze względu na zbyt wysoką temperaturę ich krzepnięcia. Wobec czego skojarzenia tarciove bardzo często pracują „na sucho”. Poznanie zjawisk i procesów zachodzących w czasie pracy wyżej wymienionych węzłów tarcia wymaga badań w temperaturach ujemnych. Jedynie na ich podstawie można poznać mechanizmy zużywania i właściwie dobrać współpracujące materiały.

Badania tribologiczne w niskich temperaturach wymagają zastosowania specjalnej, drogiej i trudno dostępnej aparatury, co w Polsce stanowiło poważną przeszkodę w rozwoju inżynierii materiałów. Jednak od lat 90-tych ubiegłego wieku taka aparatura została skonstruowana i wykorzystywana na Politechnice Radomskiej w instytucie Budowy Maszyn [ 7,8,9]. Powstały też nowe konstrukcje przeznaczone do badań tego typu. Jest to tester TT-3 opisany w niniejszym artykule oraz urządzenie T-25 skonstruowane w Instytucie Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu [1].

Korzystając z testera TT-3 przeprowadzona została seria badań eksperymentalnych, których fragment przedstawiono w niniejszym artykule. Celem pracy było porównanie zbadania charakterystyk tribologicznych uzyskiwanych dla powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych w warunkach temperatur dodatnich oraz ujemnych. Uzyskane wyniki mogą się przyczynić do rozwoju inżynierii materiałowej, zwłaszcza w zakresie nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych przeznaczonych na elementy węzłów tarcia pracujących w niskich temperaturach.

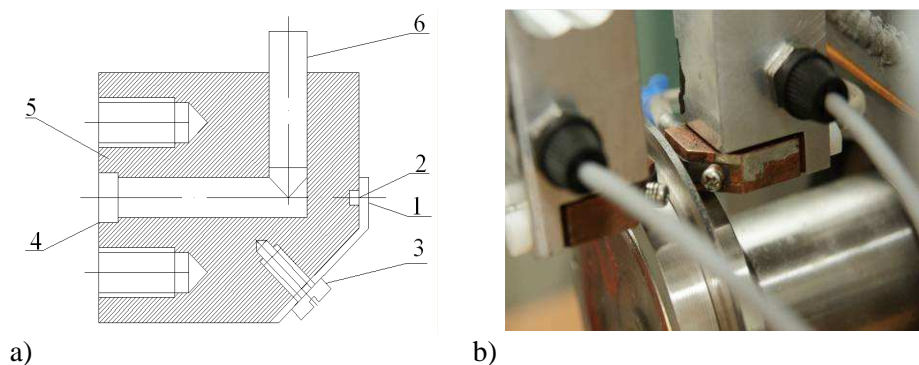


Rys. 1. Schemat konstrukcyjny testera TT-3: 1 – tuleja nośna, 2 – wałek, 3 – tarcza chłodząca, 4 – docisk próbki, 5 – pokrywa tarczy chłodzącej, 6 – przeciwpółka, 7 – PRÓBKĄ, 8 – tarcza chłodząca, 9 – przewód chłodzący, 10 – tuleja dystansowa, 11 – korpus, 12 – doprowadzenie cieczy chłodzącej.



Rys. 2. Widok ogólny testera TT-3

Parę trącą stanowią ślizgacze wykonane z wybranego materiału oraz pierścieni ze stali gat. 145Cr6 o twardości 63 HRC. Przyjęte rozwiązanie konstrukcyjne pozwala na stosowanie zarówno pierścieni stalowych, jak stalowych pokrytych warstwami zwiększającymi odporność na ścieranie. Pierścień jest elementem obrotowym, w trakcie tarcia mocowanym na tarczy zawierającej układ chłodzenia napędzanej silnikiem elektrycznym z regulatorem obrotów i przekładnią planetarną. Zastosowano zespół serwowalnika Stoeber typ PA312ED. Prędkość obrotowa tarczy regulowana jest sterownikiem podłączonym do komputera klasy PC. W celu stabilizacji termicznej tarczy zastosowano cyrkulator CF-40. Ślizgacze o powierzchniach  $F = 5, 15$  lub  $25 \text{ mm}^2$  (możliwe jest stosowanie ślizgaczy o powierzchni w zakresie  $3 \div 25 \text{ mm}^2$ ) i grubości  $0,5 \text{ mm}$  mocowane są w specjalnych uchwytach miedzianych. Uchwyt ten służy do utworzenia granicy izotermicznej w odległości  $0,5 \div 0,1 \text{ mm}$  od strefy tarcia. (rys.3).



Rys. 3. Uchwyt do mocowania próbek: a) rysunek uchwytu 1 – ślizgacz, 2 – termoelement, 3 – wkręt mocujący ślizgacz w uchwycie, 4 – przewód doprowadzający płyn, 5 – uchwyt miedziany, 6 – przewód odprowadzający płyn, b) widok uchwytu - widoczne wyprowadzenia przewodów układu pomiaru siły docisku i śruby mocujące próbki

Ślizgacz mocowany jest w gnieździe uchwytu za pomocą wkręta. W uchwycie zamontowano końcówkę termoelementu żelazo-konstantan, pozostająca w kontakcie fizycznym ze ślizgaczem. Wewnątrz uchwytu miedzianego wykonano kanał, przez który doprowadzony i odprowadzany jest płyn chłodzący.

Wartość temperatury charakteryzującej granicę izotermiczną jest mierzona za pomocą termoelementu żelazo-konstantan. Pomiar ten dokonywany jest w trakcie tarcia, przez co uwzględnia się jednocześnie wpływ ciepła tarcia i wymiany ciepła zapewnianej przez kriocykulator CF-40 (rys.4). Ślizgacze wraz z uchwytami osadzone są w głowicy pozwalającej na regulację nacisku.



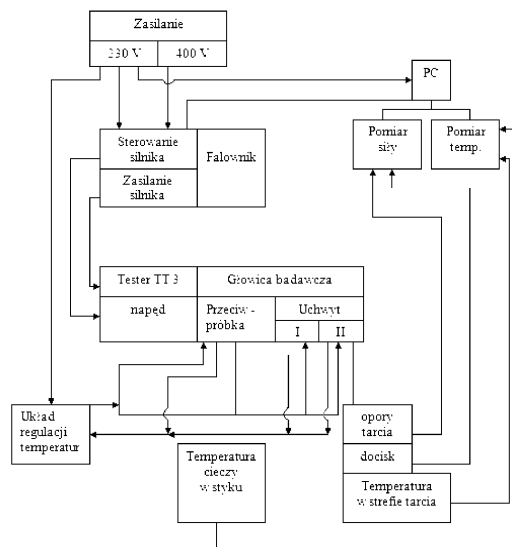
Rys. 4. Kriocykulator Julabo CF-40

Zespół obciążający testera składa się z dynamometru wykonanego w formie śruby rzymskiej. Na dynamometrze umieszczony jest tensometryczny czujnik pomiaru siły pozwalający na dokładne zadawanie zamierzonego nacisku. Do pomiaru oporów tarcia służy tensometryczny układ pomiaru siły tarcia połączony z kartą pomiarową. Zużycie próbek i przeciwpróbki mierzone jest za pomocą wagi precyzyjnej z dokładnością do 0,01 mg. Próbki były docierane przed rozpoczęciem pomiarów pod obciążeniem równym przewidywanemu pomiarowemu. Czas docierania, na podstawie wcześniejszych doświadczeń [10], ustalono na 3600 s. Prędkość poślizgu w zależności od badanej pary tarczej wynosiła mogła być regulowana w zakresie  $0 \div 2$  m/s.

Cyrkulator Cryo-Compact CF40 został wyprodukowany przez JULABO LABORTECHNIK. Jest to urządzenie służące do zasilania w stabilną temperaturowo cieczą zewnętrznych obiegów. Cyrkulator umożliwia uzyskanie temperatur w zakresie:  $-40$  do  $+150$  °C, stabilności temperatury:  $\pm 0,03$  °C i prędkości przepływu: 15 l/min. System sterowania wyposażony jest w mikroprocesorowy sterownik zapewniający wysoką stabilność temperatury. Jako ciecz chłodzącą zastosowano olej Thermal S z termicznym zakresem stosowania  $-50 \div 150$  °C.

W przypadku badań, prowadzonych poniżej temperatury otoczenia, można dodatkowo korzystać z komory klimatyzacyjnej wykonanej z poliwęglanu montowanej na głowicy układu trącego. Komora pozwala uniknąć skraplania się pary wodnej na chłodnych częściach aparatury.

Kontrolowaniu usuwania produktów zużycia ze strefy tarcia i jednoczesnemu stabilizowaniu przez to oporów tarcia służy zgarniacz filcowy. W trakcie badań wartość współczynnika tarcia była utrzymywana na stałym poziomie równym  $0,4 \pm 0,04$ .



Rys. 5. Schemat blokowy systemu sterowania i pomiaru.

Przeprowadzono badania odporności na zużycie w warunkach zużywania utleniającego i tarcia suchego w celu stwierdzenia w jakiej temperaturze (tzw. temperaturze charakterystycznej) dane skojarzenie materiałowe wykazuje zwiększoną odporność na zużywania tribologiczne. W artykule przedstawiono badania dla układu: stal C45 normalizowana we współpracy ze stalą 145Cr6 zahartowaną (63HRC).

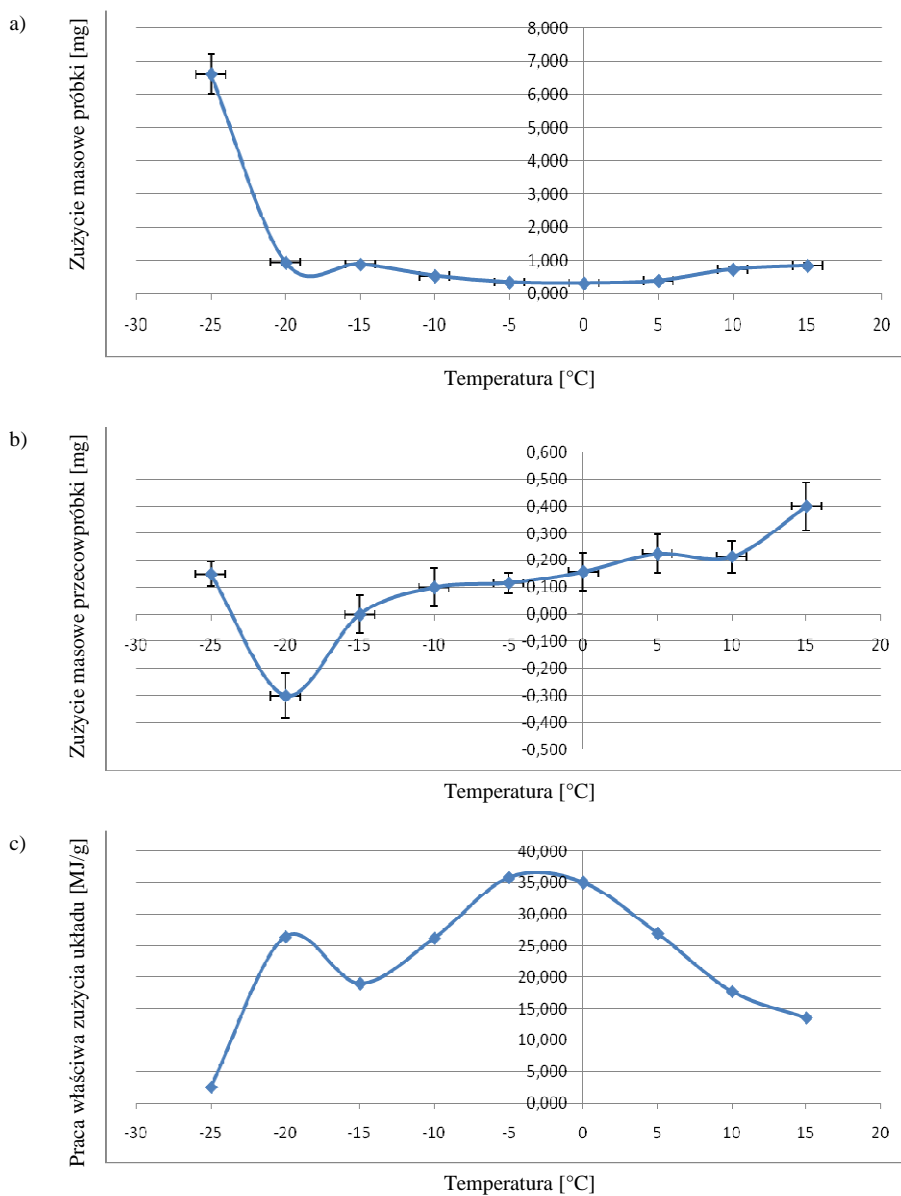
Badania temperatury charakterystycznej opisane w pracach [7,10,11,12] wskazały na wartości parametry procesu tarcia dla wybranych skojarzeń metali technicznych. Ujawniono przy tym i scharakteryzowano wpływ temperatury, nacisku i prędkości poślizgu na pracę właściwą zużycia. Korzystając z dotychczasowych wyników, wynikających z przeprowadzenia doświadczeń optymalizacyjnych, zdecydowano przeprowadzić badania odporności na zużycie w zakresie temperatur strefy tarcia w zakresie  $-25 \div +15^{\circ}\text{C}$ , z zachowaniem stałej wartości współczynnika tarcia ( $=0,4$ ) oraz prędkości poślizgu i nacisków podanych w wymienionych pracach.

W badaniach wyliczano pracę właściwą zużycia wg wzoru:

$$e_x^r = \frac{\mu \cdot p \cdot v \cdot t}{\Delta m_c} \quad [\text{MJ/g}] \quad (1)$$

gdzie:  $\mu$  – współczynnik tarcia,  $p$  – nacisk [N],  $v$  – prędkości poślizgu [m/s],  
 $t$  – czas próby [s],  $\Delta m_c$  – zmiana masy układu [g]

Każdy pomiar powtarzano sześciokrotnie, a następnie opracowano statystycznie. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Badanie odporności na zużycie pary trącej C45/145Cr6(63HRC) w funkcji temperatury strefy tarcia: a) zużycie masowe próbki, b) zużycie masowe przeciwp próbki, c) praca właściwa zużycia układu ( $P=0,588$  MPa,  $v=0,4$  m/s,  $\mu=0,4$ )

### 3. WNIOSKI

Przeprowadzone badania z wykorzystaniem urządzenia TT-03 pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- dla każdego skojarzenia materiałowego istnieje temperatura charakterystyczna (ujemna lub dodatnia) w której uzyskuje się zwiększoną (dążącą do maksymalnej) odporność na zużycie danego układu;

- przebieg zależności odporności na zużycie od temperatury strefy tarcia jest unikalną cechą danego skojarzenia materiałowego, zależną od składu chemicznego i struktury materiałów skojarzenia.

Dla wyjaśnienia wielu potencjalnych zależności (skład chemiczny, mikrotwardość, struktura) konieczne są dalsze badania fizykochemiczne i materiałowe.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Mańkowska A., Michalczewski R., Szczerek M., Wulczyński J.: Niskotemperaturowe charakterystyki tribologiczne stalowych skojarzeń ciernych. *Tribologia* nr 1/2010, str. 77÷92.
- [2] Dobrzański L. A.: *Metalowe materiały inżynierskie*. WNT, Warszawa 2004.
- [3] Quinn T. F. J., Sullivan J. L., Rowson D. M.: Origins and development of oxidational wear at low ambient temperatures. *Wear*. 1984, t. 94, s. 175–191.
- [4] Straffelini G., Trabucco D., Molinari A.: Oxidative wear of heat-treated steels. *Wear*. 2001, nr 250, s. 485–491.
- [5] So H., Yu D. S., Chuang C. Y.: Formation and wear mechanism of tribooxides and the regime of oxidational wear of steel. *Wear*. 2002, nr 253, s. 1004–1015.
- [6] Ostrovskaya Ye. L., Yukhno T. P., Gamulya G. D., Vvedenskij Yu. V., Kuleba V. I.: Low temperature tribology at the B. Verkin Institute for low temperature physics & engineering (historical review). *Tribology International*. 2001, nr 34, s. 265–276.
- [7] Żurowski W.: Energetyczny aspekt wzrostu odporności metali na zużywanie w procesie tarcia technicznie. Praca doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1996.
- [8] Żurowski W.: Badania maksymalnej odporności układów metali na zużywanie tribologiczne na zmodyfikowanej maszynie T-01. *Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław, 2002.
- [9] Żurowski W.: Stanowiska do badań maksymalnej odporności układów metali na zużywanie tribologiczne. *Logistyka* nr 2/2008. Str. 86.
- [10] Żurowski W., Sadowski J.: Badania maksymalnej odporności układów ciał metalicznych na zużywanie tribologiczne; Cz. I/II *Inżynieria Powierzchni* nr 4/2000, 1/2001, IMP – Warszawa.
- [11] Żurowski W.: Badania eksperymentalne maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne. *Tribologia* nr 4/2004 (196). str. 369÷377.
- [12] Żurowski W.: *Wear resistance maximization of frictional interface circuits (in tribology 2008)*. SAIT. ISBN: 978-0-620-38082-9. Pretoria 2008.