

ŻUROWSKI Wojciech<sup>1</sup>

## Badanie wpływu smarowania na wartość temperatury charakterystycznej

Słowa kluczowe:  
zużycie tribologiczne, odporność na zużywanie, tarcie suche, tracie mieszane

### Streszczenie

Badanie zależności wpływu smarowania na wartość temperatury charakterystycznej miało na celu stwierdzenie, czy zastosowanie smarowania oddziałuje na zmianę wartości temperatury charakterystycznej badanego układu ciernego. Również czy smarowanie, a co za tym idzie zmiana w „gospodarce” produktami ścierania, ma istotny wpływ na odporność na zużycie w warunkach zwiększonej odporności na ścieranie dla danego węzła tarcia.

W eksperymencie wykorzystano skojarzenie stal C45/145Cr6(63 HRC). Jako smar zastosowano czysty chemicznie olej parafinowy. Jest to typowy środek smarujący, często wykorzystywany w badaniach porównawczych materiałów smarnych.

### TESTS IMPACT OF LUBRICATION ON VALUES OF CHARACTERISTIC TEMPERATURE

#### Abstract

Testing impact of lubrication on values of characteristic temperature was intended to determine if lubrication affects characteristic temperature variations of a friction system and if lubrication, and the accompanying change of friction products “administration” has any substantial impact on wear of a friction centre characterised by increased wear resistance.

The experiment used a matching of C45/145Cr6(63 HRC). Chemically pure paraffin oil served as the lubricant. This is a typical lubricant commonly used in comparative testing of lubrication materials.

#### 1. WSTĘP

Prezentowane badania odporności na zużywanie opierają się na analizie przemian termodynamicznych zachodzących w systemie termodynamicznym otwartym. 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.

Wiele badań tribologicznych [1÷5] wskazuje, że na przebieg tarcia i zużycia elementów duży wpływ wywierają czynniki związane z otoczeniem (wilgotności, rodzaj medium otaczającego, próżni oraz temperatury). Przy pewnej krytycznej wartości tych wielkości osiągnięta zostaje energia aktywacji, powodująca przemiany fazowe i strukturalne w warstwach przypowierzchniowych. Takie podejście nie bierze pod uwagę możliwości stabilizacji np. temperatury w strefie tarcia oraz samego współczynnika tarcia, który może być dość precyzyjnie kontrolowany i stabilizowany.

Temperatura otoczenia węzła tarcia wpływa na właściwości fizyczne i wytrzymałościowe materiałów trących oraz na tworzenie tlenkowych struktur wtórnych. Badania w warunkach zużywania utleniającego były prowadzone przez wielu badaczy. Opracowano teorie zużywania utleniającego [6÷9]. Oceniono wpływ temperatury w strefie tarcia na tworzenie się struktur tlenkowych [10÷13]. We wszystkich wymienionych przypadkach temperatura w strefie tarcia nie była stabilizowana. W artykule przedstawiono wyniki badań pozwalające na poznanie zjawisk i procesów zachodzących w wymienionych węzłach tarcia w warunkach tarcia suchego i zużywania utleniającego ze stabilizacją temperaturach strefy tarcia. Jedynie na ich podstawie można poznać mechanizmy zużywania i właściwie dobrać współpracujące materiały.

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.

Zostały ustalone prawidłowości opisujące jakościowo i ilościowo pracę właściwą zużycia w funkcji temperatury strefy tarcia. W szczególności stwierdzono eksperymentalnie istnienie temperatury charakterystycznej warunkującej największą odporność na zużywanie dla szeregu systemów tribologicznych oraz ustalono wartości parametrów tarcia, którym odpowiada największa praca właściwa zużycia. [14]

Pojawiło się pytanie, czy temperatura charakterystyczna zależy od rodzaju tarcia. Dlatego przeprowadzono badania w warunkach tarcia mieszanego. Badanie zależności wpływu smarowania na wartość temperatury charakterystycznej miało na celu stwierdzenie, czy zastosowanie smarowania oddziałuje na zmianę wartości temperatury charakterystycznej

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

badanego układu ciernego. Również czy smarowanie, a co za tym idzie zmiana w „gospodarce” produktami ścierania, ma istotny wpływ na odporność na zużycie w warunkach zwiększonej odporności na ścieranie dla danego węzła tarcia.

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

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.

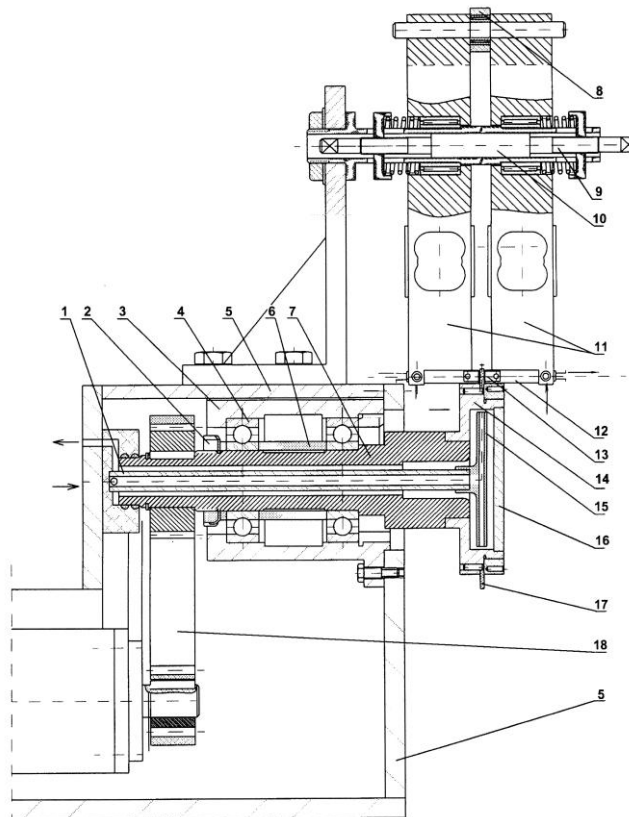
Temperatura otoczenia węzła tarcia wpływa na właściwości fizyczne i wytrzymałościowe materiałów trących [15] oraz na tworzenie tlenkowych struktur wtórnych [12,13,16], co również znajduje odzwierciedlenie w charakterystykach tarcowych i zużyciu elementów trących.

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 [17]. 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 tarcowych 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 tarcowe 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 18÷19]. Powstały też nowe konstrukcje przeznaczone do badań tego typu. Jest to tester TT-3 wykorzystany w niniejszych badaniach.

Za obiekt badań przyjęto układ trących się ciał metalicznych. Realizację fizyczną obiektu badań, stanowi układ pierścien – ślizgacz (rys. 1).



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny testera TT-3: 1 – doprowadzenie ciecchy chłodzącej, 2 – nakrętka zamykająca, 3 – tuleja nośna, 4 – łożysko, 5 – korpus, 6 – tuleja dystansowa, 7 – walek, 8 – opora przetwornika pomiaru momentu tarcia, 9 – śruba rzymska, 10 – tuleja ślizgowa, 11 – przetwornik tensometryczny obciążenia, 12 – uchwyt próbki, 13 – próbka, 14 – tarcza chłodząca, 15 – wewnętrzna tarcza chłodząca, 16 – pokrywa tarczy chłodzącej, 17 – przeciwpróbka, 18 – pasek zębaty napędu

Pierścień stanowi obracający się element pary tarczej. Zastosowano jednak dwa nieruchome ślizgacze w postaci próbek o płaskiej powierzchni styku z pierścieniem. Materiał próbki można dobrać osobno dla każdego skojarzenia, aby możliwa była ocena wpływu własności fizycznych, składu chemicznego, twardości i struktury materiału na zjawisko zwiększania odporności na zużywanie. Możliwe jest zastosowanie zarówno próbek metalicznych, jak i wykonanych z innych materiałów.

Układ dwóch próbek dociskanych symetrycznie do tarczy zapewnia równomierne obciążenie. System ten umożliwia łatwy pomiar siły tarcia oraz, w razie konieczności, pomiar sumarycznego liniowego zużycia próbek. Podstawową i najważniejszą cechą testera jest zapewnienie stabilizacji temperatury w strefie tarcia.

Z wykorzystaniem testera TT-3 przeprowadzona została seria badań eksperymentalnych, których fragment przedstawiono w niniejszym artykule. Celem pracy było porównanie charakterystyk tribologicznych uzyskiwanych dla powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych w warunkach temperatur dodatnich oraz ujemnych.

W eksperymencie wykorzystano skojarzenie stal C45/145Cr6. Jako smar zastosowano czysty chemicznie olej parafinowy. Jest to typowy środek smarujący, często wykorzystywany w badaniach porównawczych materiałów smarnych.

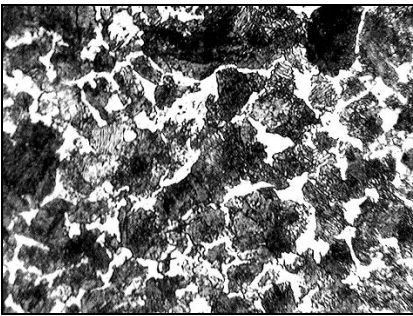
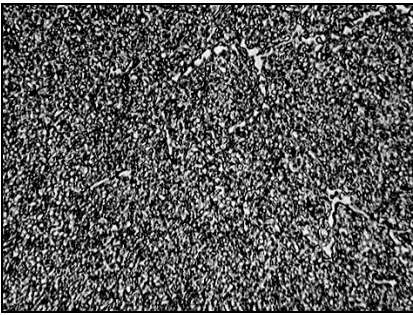
W artykule przedstawiono badania dla układu: stal C45 we współpracy ze stalą 145Cr6 zahartowaną (63HRC). Stal C45 jest stalą konstrukcyjną, węglową, stosowana najczęściej w postaci ulepszonej cieplnie, na średnio obciążone elementy maszyn (osie, wały, koła zębate, tarcze). Przeprowadzono badania struktury zarówno stali C45 w postaci normalizowanej, jak i po ulepszeniu cieplnym.

Stal 145Cr6 jest stalą narzędziową stal narzędziowa do pracy na zimno; do hartowania w oleju, stabilną wymiarowo po hartowaniu, odporną na ścieranie. Charakterystyki materiałów podano w tabelach 1 i 2.

Tab. 1. Charakterystyka materiałów ślizgaczy i pierścienia

Lp.	Materiał	Stan technologiczny	Twardość	Skład chemiczny, %
1.	Stal C45	normalizowana	18 HRC	C – 0,5 Mn – 0,67 Si – 0,21 Ni – 0,08 Cr – 0,15
2.	Stal 145Cr6	hartowana	63 HRC	C – 1,4 Mn – 0,59 Si – 0,28 Ni – 0,08 Cr – 1,6 V – 0,17

Tab. 2. Opis struktur stali C45 i 145Cr6

Materiał	Widok struktury	Opis struktury
stal C45 po normalizowaniu		struktura perlityczno-ferrytyczna: feryt wokół równoosiowych ziaren perlitu o dużej dyspersji; ziarna perlitu są średniej wielkości (skala nr 7)
stal 145Cr6 po hartowaniu 63 HRC		struktura martenzytu drobnoiglastego (skrytoiglastego) z niewielką ilością bardzo drobnych węglików (Fe,Cr) <sub>3</sub> C

Badania temperatury charakterystycznej opisane w pracach [18,21,22] 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 warunkach tarcia suchego 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:

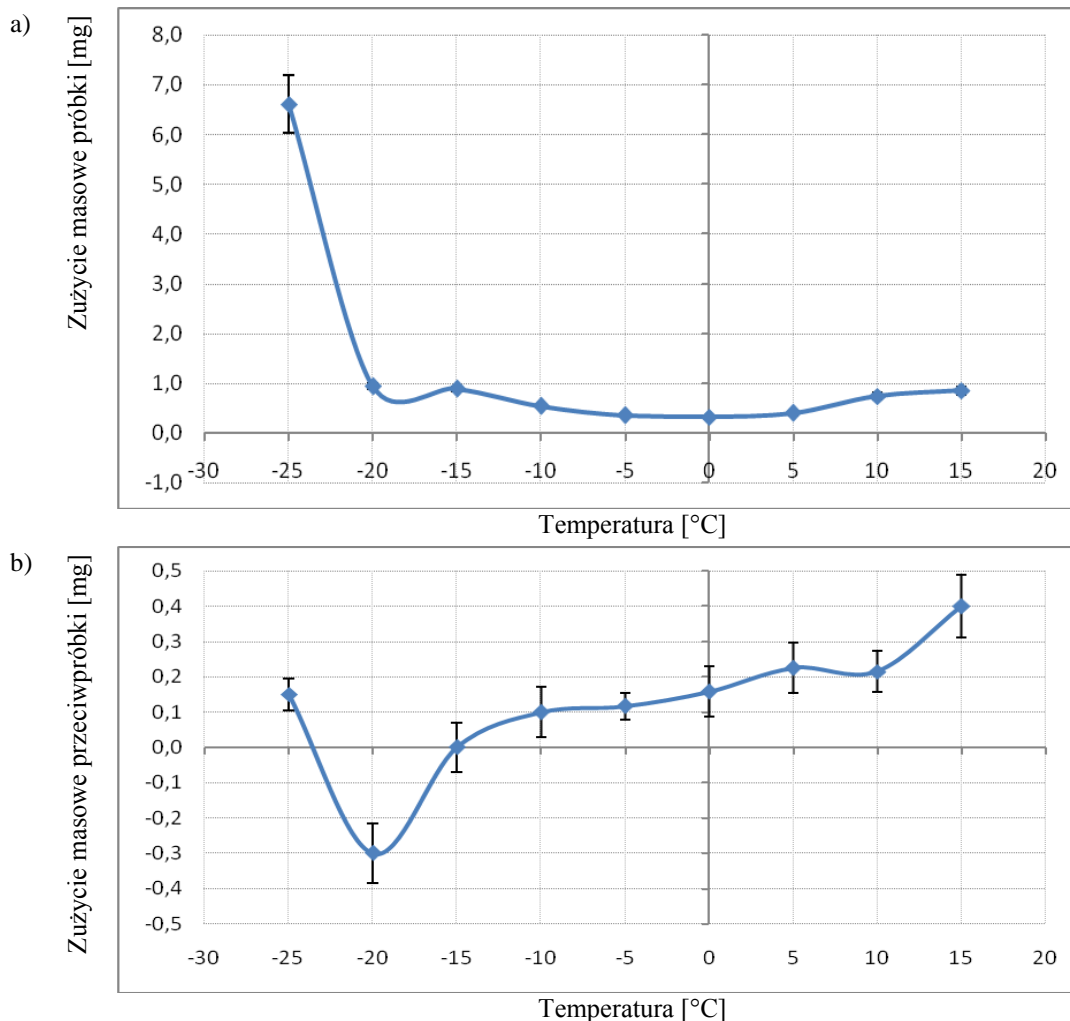
$$e_x^r = \frac{\mu \cdot p \cdot v \cdot t}{\Delta m_c} \text{ [J/g]} \quad (1)$$

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

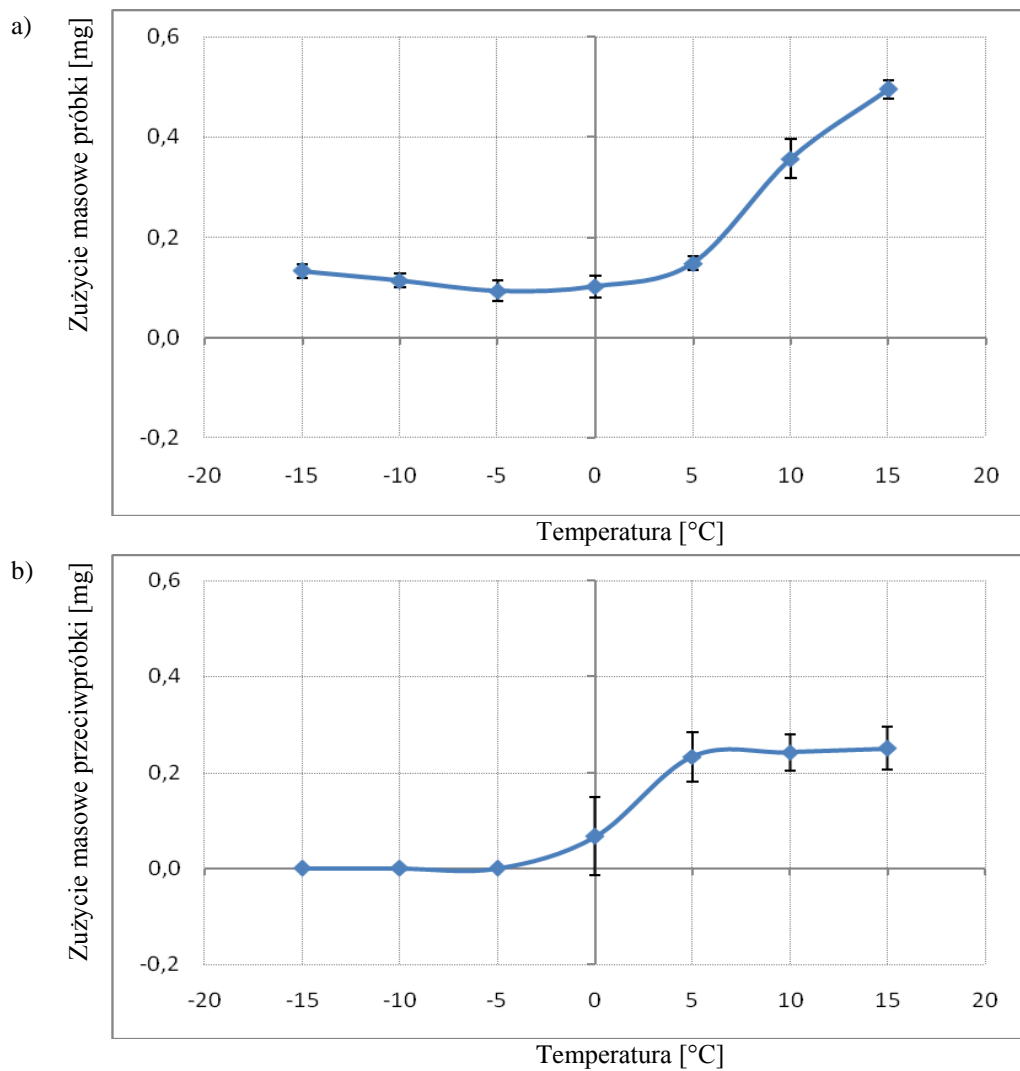
Każdy pomiar powtarzano sześciokrotnie, a następnie opracowano statystycznie. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 6.

Badanie zużyciowe w warunkach tarcia mieszanego przeprowadzono w zakresie temperatur  $-15 \div +15^{\circ}\text{C}$ . Biorąc pod uwagę fakt, że dla badanego skojarzenia temperatura charakterystyczna w tarcniu suchym miała wartość około  $-5^{\circ}\text{C}$ , uznano, iż jest to zakres wystarczający dla stwierdzenia ewentualnego wpływu smarowania na przesunięcie temperatury charakterystycznej. Ponadto poniżej temperatury  $-15^{\circ}\text{C}$  olej parafinowy przechodził w stan stały. Zastosowano smarowanie mieszane: olej parafinowy był podawany na pierścień (przeciwpróbkę) z wykorzystaniem wanny. Wartość współczynnika tarcia nie była kontrolowana. W trakcie eksperymentu współczynnik tarcia ustabilizował się na poziomie  $0,12 \pm 0,04$ .

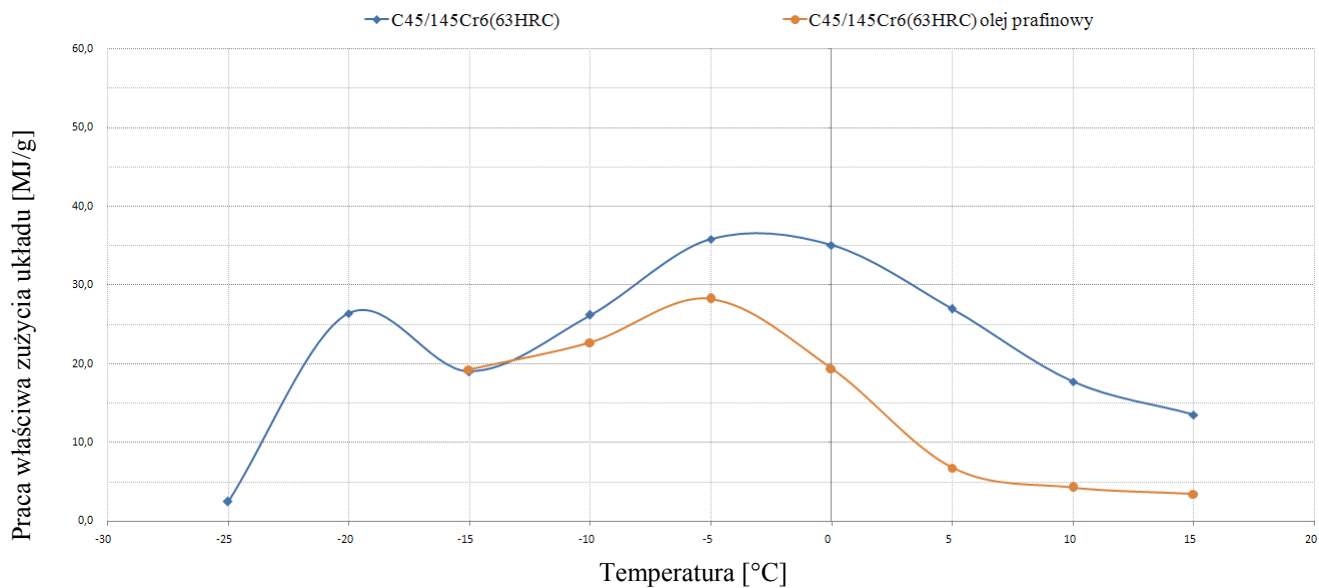
Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono odpowiednie wyniki badań odporności na zużywanie dla obu rodzajów tarcia. Na rysunku 4 porównano zmianę pracy właściwej zużycia, jako funkcję temperatury dla analogicznych układów w tarcniu suchym i mieszanym.



Rys. 2. Badanie odporności na zużywanie pary trącej C45/145Cr6 jako funkcji temperatury strefy tarcia: a) zużycie masowe próbki, b) zużycie masowe przeciwpróbki, ( $p=0,588 \text{ MPa}$ ,  $v=0,4 \text{ m/s}$ ,  $\mu=0,4$ )



Rys. 3. Badanie odporności na zużywanie pary trącej C45/145Cr6 w tarciu mieszanym w funkcji temperatury strefy tarcia: a) zużycie masowe próbki, b) zużycie masowe przeciwipróbki ( $p=0,588$  MPa,  $v=0,4$  m/s,  $\mu=0,12$ )



Rys. 4. Porównanie wartości pracy właściwej zużycia w funkcji temperatury dla analogicznych skojarzeń tarciovych w tarciu suchym i mieszanym

### 3. WNIOSKI

Stwierdzono, że zwiększona odporność na zużywanie występuje w obu przypadkach w temperaturze około  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , co oznacza, że zastosowanie oleju parafinowego nie miało wpływu na wartość temperatury charakterystycznej. Innymi słowy przeprowadzony eksperyment nie wykazał istnienia wpływu rodzaju tarcia na wartość temperatury charakterystycznej. Z przedstawionego porównania wynika inny przebieg zmienności pracy właściwej zużycia badanych skojarzeń i inne wartości maksymalne tej pracy. Niewątpliwie jest to spowodowane, wspomnianą już wcześniej, „gospodarką” produktami ściernia. W przypadku tarcia mieszanego produkty te są wyrzucane (wymywane przez olej) ze styku ściernego. Jednak mechanizm tarcia mieszanego jest inny niż mechanizm tarcia suchego, między innymi z powodu tworzenia się zupełnie odmiennych struktur tarcowych. Dlatego bezpośrednie porównywanie uzyskanej wartości pracy właściwej zużycia nie jest uprawnione.

### 4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Maldonado D.: *The influence of dynamic properties of tribotesters on coefficient of friction*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 2008;3(155): 7-18.
- [2] Maldonado D.: *The influence of test parameters on the coefficient of friction*. Tribologia 2008; 6: 83-92.
- [3] Mańkowska A, Michalczewski R, Szczerek M, Wulczyński J.: *Niskotemperaturowe charakterystyki tribologiczne stalowych skojarzeń ciernych*. Tribologia 2010; 1: 77-92.
- [4] Mańkowska A, Piekoszewski W, Szczerek M.: *Badania tarcia i zużycia powłok przeciwzużyciowych w próżni*. Tribologia 2009;3: 125-138.
- [5] Michalczewski R, Piekoszewski W, Szczerek M, Tuszyński W, Wiśniewski M.: *Effect of friction pair configuration and surroundings conditions on friction and wear*. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1998; 2(114): 301-308.
- [6] Hong H, Hochman R F , Quinn T F J.: *A new approach to the oxidational theory of mild wear*. STLE Trans. 1988; 31: 71-75.
- [7] Quinn T F J.: *Oxidational wear*. Wear 1971; 18: 413-419.
- [8] Quinn T F J.: *Review of oxidational wear. Part I: The origins of oxidational wear*. Tribol. Int. 1983; 16: 257-271.
- [9] Sullivan J., Quinn T F J, Rowson D M.: *Developments in the oxidational theory of mild wear*. Tribol. Int. 1980; 12: 153-158.
- [10] Allen C B, Quinn T F J, Sullivan J L: *The oxidational wear of high-chromium ferritic steel on austenitic stainless steel*. ASME Trans. J. Tribol. 1986; 108: 172-179.
- [11] Archard J F.: *The temperature of rubbing surfaces*. Wear 1958/59; 2: 438-455.
- [12] So, H., Yu, D. S., Chuang, C. Y.: *Formation and wear mechanism of tribooxides and the regime of oxidational wear of steel*. Wear. (2002), No.253 pp.1004-1015.
- [13] Straffelini, G., Trabucco, D., Molinari, A.: *Oxidative wear of heat-treated steels*. Wear. (2001), No.250 pp.485-491.
- [14] Żurowski W.: *Fizyczne aspekty maksymalizacji odporności na zużywanie elementów systemów tribologicznych*. Seria Monografie: nr 152. Radom, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2010.
- [15] Dobrzański L A.: *Materiały inżynierskie*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne 2006.
- [16] Quinn, T. F. J., Sullivan, J. L., Rowson, D. M.: *Origins and development of oxidational wear at low ambient temperatures*. Wear, (1984), No.94 pp.175-191.
- [17] 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), No.34 pp.265-276.
- [18] Żurowski, W.: *Energetyczny aspekt wzrostu odporności metali na zużywanie w procesie tarcia technicznie suchego*. Rozprawa doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, (1996).
- [19] Żurowski W.: *Badania maksymalnej odporności układów metali na zużywanie tribologiczne na zmodyfikowanej maszynie T-01*. Wrocław, Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej, 2002.
- [20] Żurowski W.: *Stanowiska do badań maksymalnej odporności układów metali na zużywanie tribologiczne*. Logistyka nr 2/2008. Str. 86
- [21] Żurowski, W., Sadowski, J.: *Badania maksymalnej odporności układów ciał metalicznych na zużywanie tribologiczne*. Cz. I/II. Inżynieria Powierzchni – Surface Engineering, (2000), No.4 pp. 46÷51; (2001), No.1 pp.41÷55.
- [22] Żurowski, W.: *Wear resistance maximization of frictional interface systems* (in Tribology 2008). Pretoria, SAIT 2008. ISBN: 978-0-620-38082-9.