

ŻUROWSKI Wojciech, GUMIŃSKI Robert

BADANIA ODPORNOŚCI TRIBOLOGICZNEJ STALI TYPU MARAGING ZA POMOCĄ MASZINY TT-03

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań odporności tribologicznej stali typu maraging przeprowadzone stanowisku badawczym typu trzpień-tarcza do badań maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne. Stanowisko wykorzystuje tester typu TT-03 wyprodukowany w Instytucie Budowy Maszyn Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego w Radomiu. Opisano konstrukcję testera oraz podano zakres wykonywanych badań tribologicznych.

WSTĘP

Liczne badania tribologiczne przeprowadzone przez wielu autorów dowiodły, w tym również najnowsze [2,12] wskazują, że tradycyjnie zakłada się, że na przebieg tarcia i zużycia elementów oprócz zadawanych parametrów pracy węzła tarcia (obciążenie, prędkość 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 ustalane 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 [4,5,6], 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 [3]. Nie można więc tych danych wykorzystać w przypadku materiałów na pary trące przeznaczone do pracy w niskich temperaturach.

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 w Instytucie Budowy Maszyn UTH w Radomiu [10,11,12].

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 [2].

1. STANOWISKO BADAWCZE

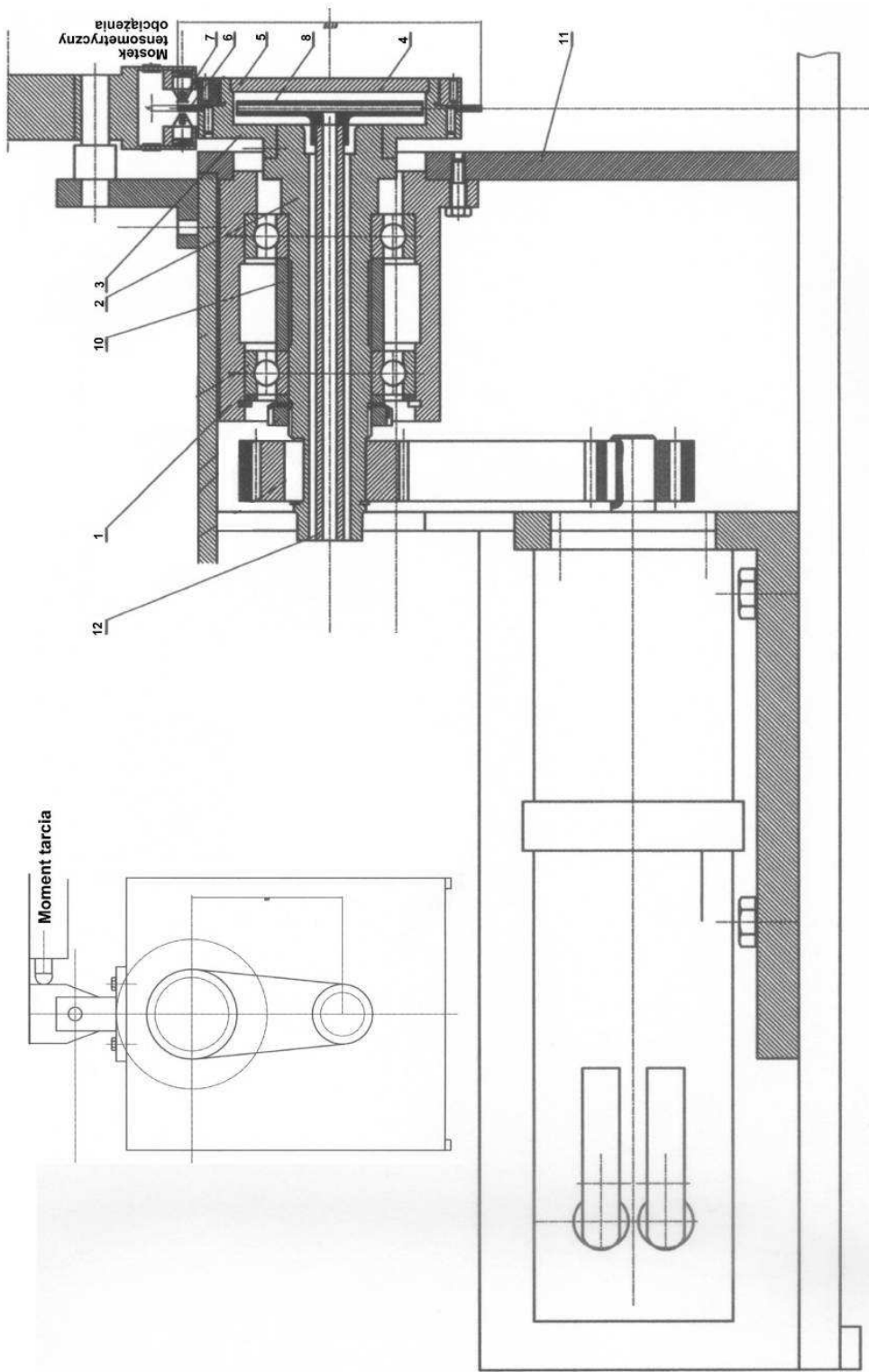
Korzystając z testera TT-3 przeprowadzona została seria eksperymentów, których fragment przedstawiono w niniejszym artykule. Celem pracy było porównanie zbadania charakterystyk tribologicznych uzyskiwanych dla powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych w warunkach temperatur dodatnich oraz ujemnych.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

Za obiekt badań przyjęto układ trących się ciał metalicznych. Realizację fizyczną obiektu badań, podobnie jak we wcześniejszych testerach, stanowi układ pierścieni – ślizgacz. Pierścień stanowi obracający się element pary trącej. Zastosowano jednak dwa nieruchome ślizgacze w postaci próbek o płaskiej powierzchni styku z pierścieniem. Materiał próbki można dobierać 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 dobrze modeluje układy sprzęgające, a ponadto zapewnia równomierne obciążenie. Obciążenia próbek są wewnętrznymi siłami układu obciążającego. System ten gwarantuje równe obciążenie obydwu próbek i umożliwia łatwy pomiar siły tarcia oraz, w razie konieczności, pomiar sumarycznego liniowego zużycia próbek.



Rys. 1. Widok ogólny testera TT-3



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

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 serwo-silnika Stoeber typ PA312ED. Prędkość obrotowa tarczy regulowana jest sterownikiem podłączonym do komputera klasy PC. W celu stabilizacji termicznej tarczy zastosowano cyrkulator CF-40. Ślizgacze prostopadłościennne o powierzchni $F = 50 \text{ mm}^2$ i grubości 2,5 mm mocowane są w specjalnych uchwytach miedzianych. Uchwyty te służą do utworzenia granicy izotermicznej w odległości 0,5–0,1 mm od strefy tarcia. Ślizgacz mocowany jest w gnieździe uchwytu wciskowo. 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. Ślizgacze wraz z uchwytami osadzone są w głowicy pozwalającej na regulację nacisku.

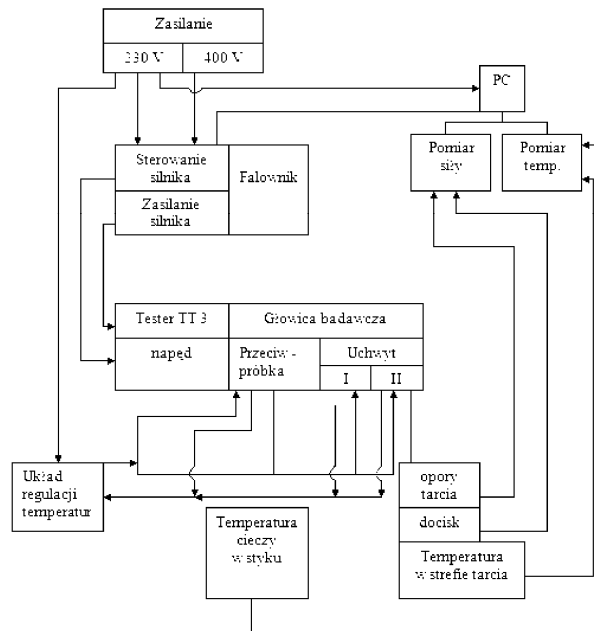
Zespół obciążający testera składa się z dynamometru wykonanego w formie śruby rzymskiej. Na dynamometrze umieszczony jest tensometryczny czujnik pomiaru siły pozwalający na dokładne zadawanie zamierzonego nacisku. Do pomiaru oporów tarcia służy tensometryczny układ pomiaru siły tarcia połączony z kartą 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 trącej może być regulowana w zakresie $0 \div 2 \text{ m/s}$.

Cyrkulator JULABO LABORTECHNIK Cryo-Compact CF40 służy do zasilania w stabilną temperaturowo ciecz zewnętrznych obiegów. Cyrkulator umożliwia uzyskanie temperatur w zakresie: -40 do $+150 \text{ }^\circ\text{C}$, stabilności temperatury: $\pm 0,03 \text{ }^\circ\text{C}$ 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 $-50 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

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.

Kontrołowaniu 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 $0,4 \pm 0,05$.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat blokowy systemu sterowania i pomiaru testera. Zastosowano w nim trzy termoelementy typu Czaki TP-201 do kontroli temperatury: jeden w tarczy do której mocowana jest przeciwpróbka i dwa w uchwytach próbek. Ponadto wykorzystywane są: układ pomiaru oporów tarcia wykorzystujący przetwornik Hottinger S2 i układ pomiaru siły docisku próbek TENMEX. Sygnały zbierane są z wykorzystaniem modułów akwizycji danych podłączonych do komputera. Zastosowano moduł firmy Advantech USB4718 dla pobierania danych z termoelementów i moduł WOBIT ADT4U do pobierania danych z przetworników siły. Zwrotnie uzyskiwane są sygnały sterujące prędkości poślizgu i temperaturą.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu sterowania i pomiaru.

2. BADANIA TRIBOLOGICZNE Z WYKORZYSTANIEM TESTERA TT-3

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 wyniki badań dla układu: 3 rodzaje stali maraging we współpracy ze stalą 145Cr6 zahartowaną (63HRC). Badano trzy rodzaje stali maraging oznaczone, jako:

- maraging1 - stal 1/49/30/2 (ozn., producenta)
- maraging2 - stal 2/49/30/3 (j.w.)
- maraging3 - stal 3/49/3/3 (j.w.)

Korzystając z dotychczasowych wyników, wynikających z przeprowadzenia doświadczeń optymalizacyjnych [7,8,9], 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 wyliczono pracę właściwą zużycia wg wzoru:

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

gdzie: μ – współczynnik tarcia, p – nacisk [N], v – prędkości poślizgu [m/s],
 t – czas próby [s], Δm_c – zmiana masy układu [g]

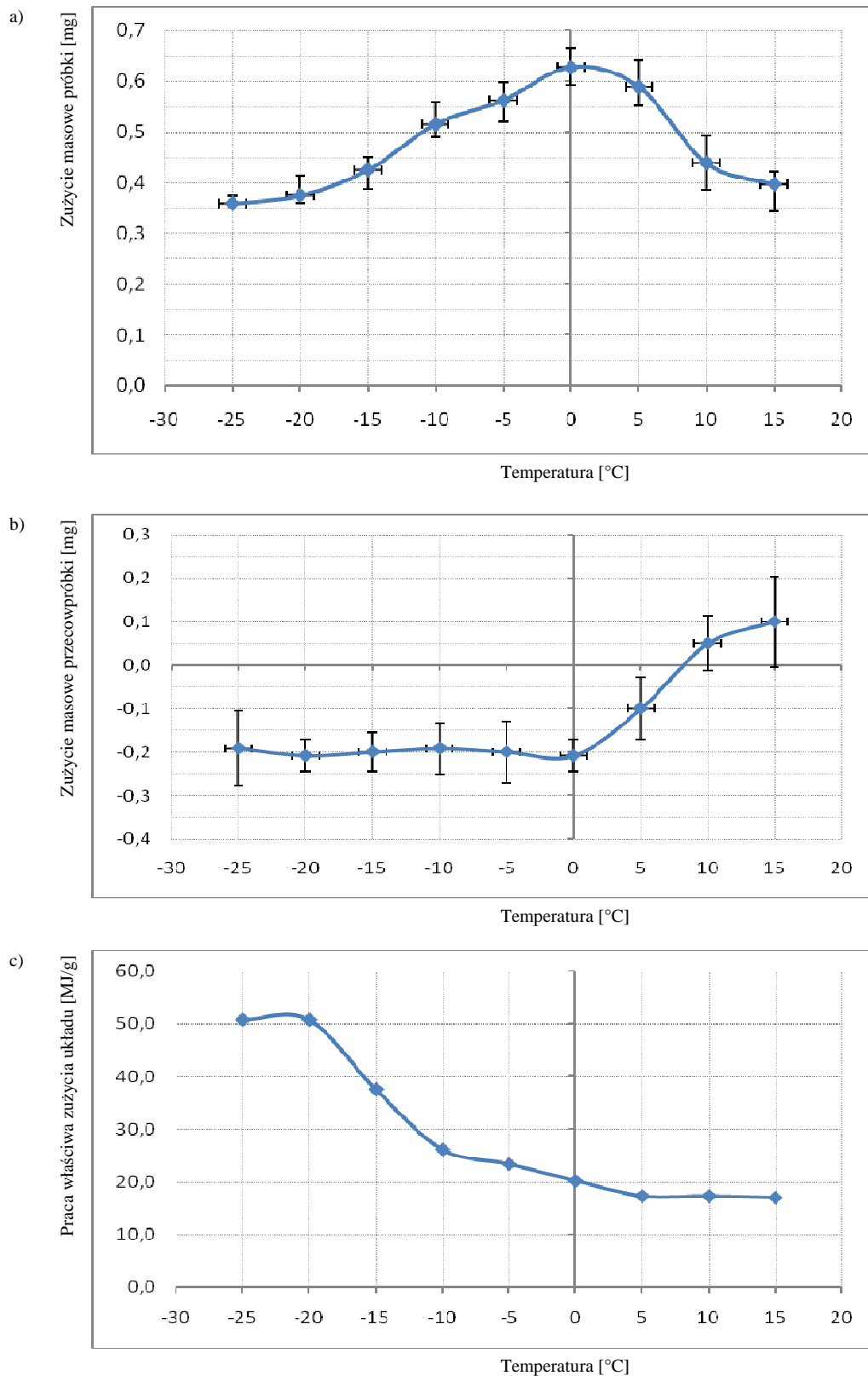
Zastosowano następujące parametry:

$v = 0,4$ m/s; $t = 900$ s; $p = 29,43$ N; $\mu = 0,4 \pm 0,05$.

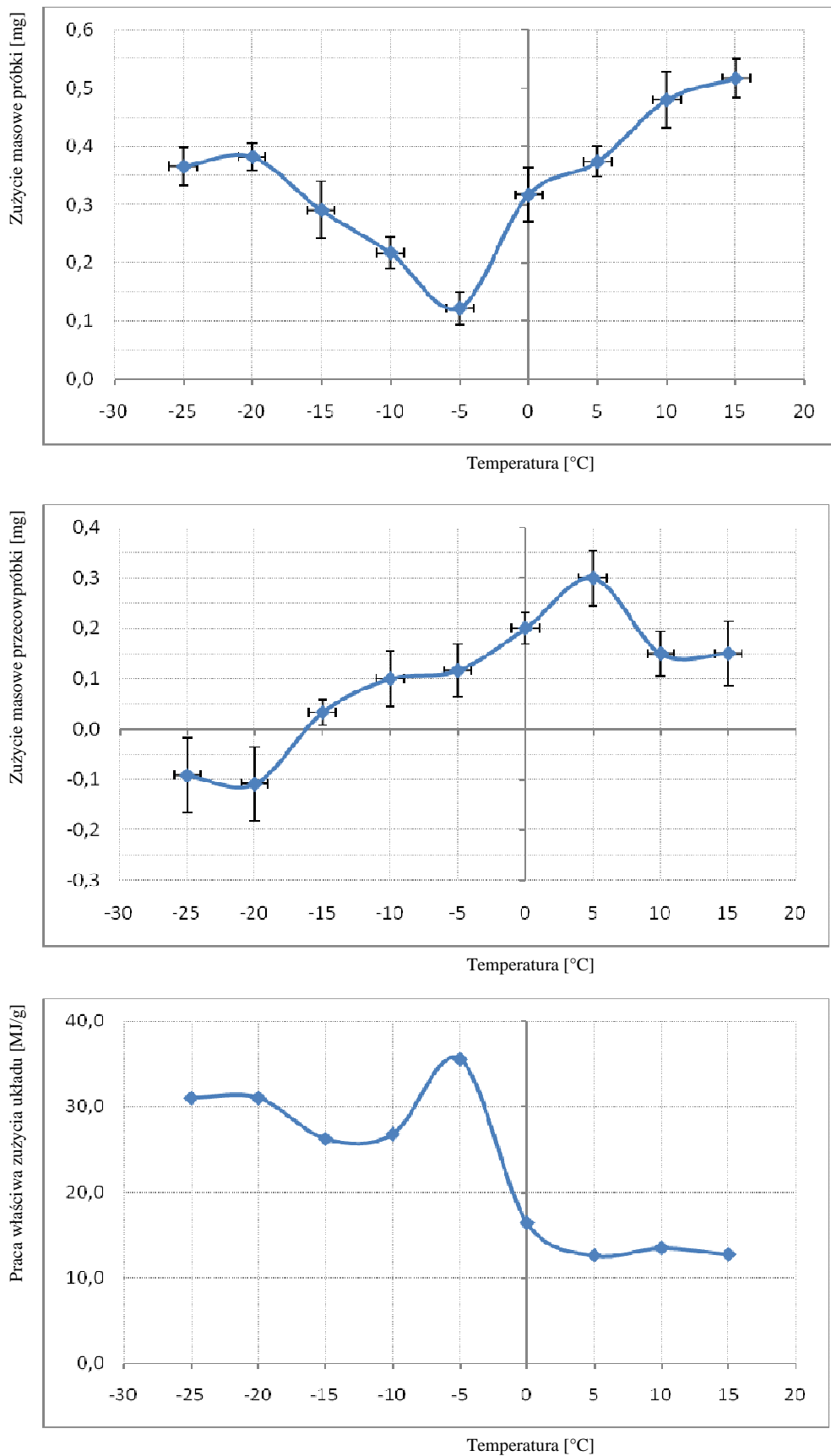
Każdy pomiar powtarzano sześciokrotnie, a następnie opracowano statystycznie.

3. WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH STALI MARAGING

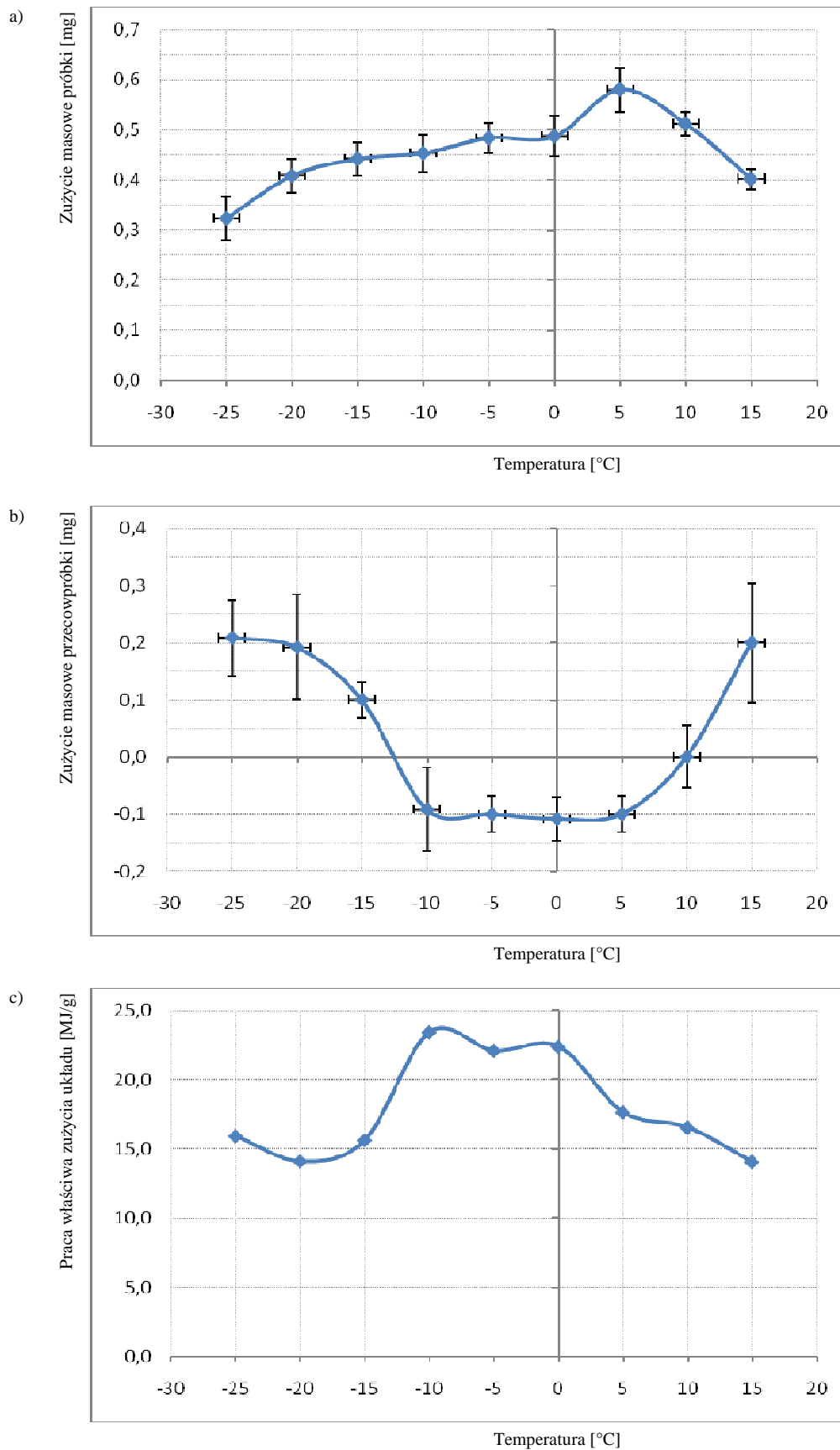
Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunkach 4, 5 i 6. Wskazano błąd pomiarowy.



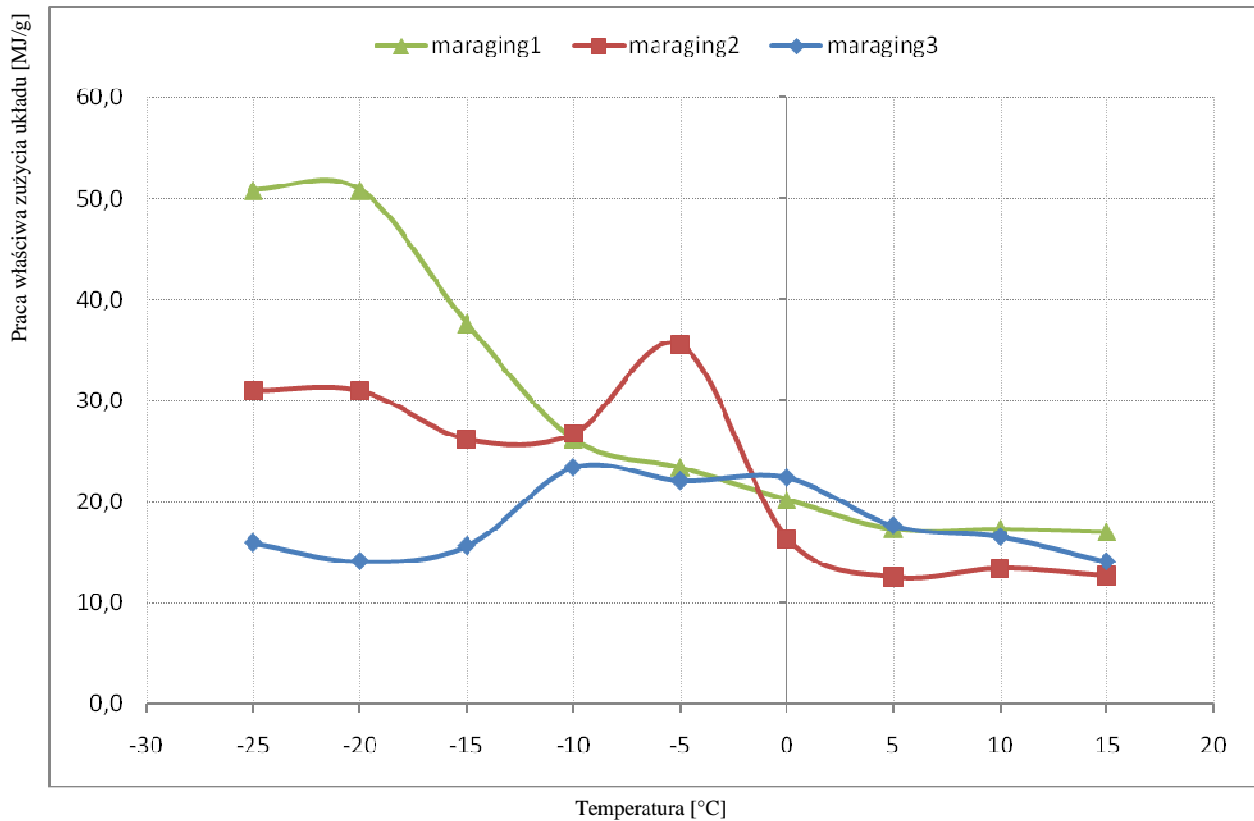
Rys. 4. Badanie odporności na zużycie pary trącej Maraging1/145Cr6(63HRC) w funkcji temperatury strefy tarcia: a) zużycie masowe próbki, b) zużycie masowe przeciwopróbki, c) praca właściwa zużycia układu ($P=0,588$ MPa, $v=0,4$ m/s, $\mu=0,4$)



Rys. 5. Badanie odporności na zużycie pary trące maraging2/145Cr6(63HRC) w funkcji temperatury strefy tarcia: a) zużycie masowe próbki, b) zużycie masowe przeciwpróbki, c) praca właściwa zużycia układu ($P=0,588$ MPa, $v=0,4$ m/s, $\mu=0,4$)



Rys. 6. Badanie odporności na zużycie pary trącej mararaging3/145Cr6(63HRC) w funkcji temperatury strefy tarcia: a) zużycie masowe próbki, b) zużycie masowe przeciwpróbki, c) praca właściwa zużycia układu ($P=0,588$ MPa, $v=0,4$ m/s, $\mu=0,4$)



Rys. 7. Wpływ struktury materiału na pracę właściwą zużycia jako funkcji temperatury dla skojarzeń 3 rodzajów stali maraging i 145Cr6.

PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania stali z grupy maraging 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;
- zastanawiające i wymagające wyjaśnienia jest odmienne zachowanie stali maraging2, można domniemywać, że spowodowane jest ono występowaniem w strukturze stali cząstek o wymiarach nanometrycznych.

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

BIBLIOGRAFIA

1. Dobrzański L. A.: Metalowe materiały inżynierskie. WNT, Warszawa 2004.
2. Mańkowska A., Michalczewski R., Szczerek M., Wulczyński J.: Niskotemperaturowe charakterystyki tribologiczne stalowych skojarzeń ciernych. Tribologia nr 1/2010. str. 77÷92.

3. 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.
4. 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.
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. Straffelini G., Trabucco D., Molinari A.: Oxidative wear of heat-treated steels. *Wear*. 2001, nr 250, s. 485–491.
7. Żurowski W., Brzózka K., Górka B.: Analysis of surface layers and wear products by Mössbauer spectral analysis. *Wear* 2013; 297: 958-965.
8. 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.
9. Żurowski W.: Badania eksperymentalne maksymalnej odporności na zużywanie tribologiczne. *Tribologia* nr 4/2004 (196). str. 369÷377.
10. 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.
11. Żurowski W.: Energetyczny aspekt wzrostu odporności metali na zużywanie w procesie tarcia techniczne. Praca doktorska. Wydział Mechaniczny, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1996.
12. Żurowski W.: Stanowiska do badań maksymalnej odporności układów metali na zużywanie tribologiczne. *Logistyka* nr 2/2008. Str. 86.

INVESTIGATIONS OF THE TRIBOLOGY RESISTANCE OF COUPLES OF MARAGING STEELS ON THE TRIBOLOGY WASTE BY MACHINE TT-3

Abstract

This paper presents the results of tribological resistance maraging steels conducted a pin-on-disc test maximum tribological wear resistance. Position of tester uses a TT-03 produced at the Institute of Mechanical Engineering at the University of Technology and Humanities in Radom. Describes the structure of the tester and given the scope of tribological tests performed.

Autorzy:

dr hab. inż. **Wojciech Żurowski** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Mechaniczny; e-mail: wzurow@uthrad.pl,

mgr inż. **mgr inż. Robert Gumiński** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu, Wydział Mechaniczny