

MODELLING INFLUENCE OF TEMPERATURE FOR ASSESSMENT OF WEAR ELEMENTS OF FRICTIONAL JOINTS

Czesław Pakowski, Tomasz J. Kałdoński, Tadeusz Kałdoński

Military University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Gen. Sylwestra. Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland
tel. +48 22 6837503, 22 6837384
email: c.pakowski@wme.wat.edu.pl, tomasz.kaldonski@wme.wat.edu.pl

Abstract

In the article is presented continuous method for measurement of wear in conditions of technically dry friction of tribological cinematic pairs type pin-on-disk of T-11 tester, for example. Also is discussed modification of measurement system tester, which it makes possibility synchronization measurement respecting angle position of counter-sample. For six selected joints is appointed a correction for thermal expansion in dependence on temperature of frictional pair as well on speed of temperature change.

For continuous of recorder temperature and displacement are carried out research wear for typical materials as well as is measured total wear after finish test. The analysis of obtained results shows existence of correlation between total linear experimental wear and analytical value of total linear wear takes into consideration correlations for thermal expansion. However, during friction there is not correlation between recorded change of dimensions joint and total wear. It shows correction this model.

Results calculations of linear wear are overstate in relation to obtained value of wear in direct measurements. It doesn't lower possibility using established method for interpretation results of research wear.

Keywords: dry friction, thermal expansion, abrasive wear

MODELOWANIE WPLYWU TEMPERATURY NA OCENĘ ZUŻYCIA ELEMENTÓW SKOJARZEŃ CIERNYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodę ciągłego pomiaru zużycia w warunkach tarcia technicznie suchego węzła tribologicznego typu trzpień-tarcza przy zastosowaniu testera T-11. Omówiono modyfikację układu pomiarowego testera umożliwiającą synchronizację pomiaru z położeniem kątowym przeciwpróbki. Dla sześciu wybranych skojarzeń wyznaczono poprawkę na rozszerzalność termiczną w zależności od temperatury węzła tarcia oraz od szybkości zmian tej temperatury.

Wykonano badania zużycia wytypowanych materiałów, przy ciągłej rejestracji temperatury i przemieszczenia oraz zmierzono zużycie całkowite po zakończeniu testu. Analiza uzyskanych wyników wskazuje na istnienie korelacji między sumarycznym zużyciem liniowym skojarzenia wyznaczonym eksperymentalnie a obliczoną wartością zużycia liniowego, przy uwzględnieniu poprawki na rozszerzalność termiczną. Brak jest natomiast korelacji między rejestrowaną podczas tarcia zmianą wymiarów skojarzenia a zużyciem całkowitym. Dowodzi to prawidłowości przyjętego modelu, konieczne jest jednak poprawienie jego dokładności.

Wyniki obliczeń zużycia liniowego są zawyżone w stosunku do wartości zużycia uzyskanych w pomiarach bezpośrednich. Nie obniża to jednak możliwości stosowania przyjętej metody do interpretacji wyników badania zużycia.

Słowa kluczowe: tarcie suche, rozszerzalność cieplna, zużycie tarciove

1. Wstęp

Wiele zespołów mechatronicznych urządzeń technicznych, w tym także pojazdów mechanicznych, pracuje w warunkach tarcia technicznie suchego, np. różne układy przekaźnikowe siły, momentu lub sygnału, elementy ruchome mierników itp. Są one często wykonywane jako kinematyczne pary tarciove, jeden element wykonany jest ze stali stopowej, a drugi z metalu lub innego tworzywa o pewnych właściwościach samosmarowania, np. z kompozytu epoksydowego. Modelowanie procesu zużycia takich systemów tribologicznych jest bardzo potrzebne głównie w celu: identyfikacji czynników wpływających na jego przebieg, znalezienia i opracowania optymalnej metody oceny intensywności zużycia oraz doskonalenia technik pomiarowych.

Zużycie oraz generowanie ciepła tarcia to najważniejsze czynniki ograniczające okresy poprawnej pracy i obniżające trwałość maszyn i urządzeń technicznych [1]. Ciągły pomiar i rejestrowanie zużycia, a zatem wyznaczenie intensywności zużycia (mimo rozwiniętej techniki pomiarowej) nadal nastęca duże trudności. Obserwowane „in situ” podczas badań tribologicznych zmiany wymiarów liniowych elementów układów tribologicznych są wypadkową dwóch przeciwstawnych procesów: zmniejszania wymiarów na skutek zużycia tribologicznego oraz wzrostu wymiarów wywołanego rozszerzalnością objętościową wynikającą z procesów cieplnych towarzyszących tarcia. Oddzielenie wpływu składowej ciepłej powinno pozwolić na ciągłą ocenę wartości zużycia w funkcji drogi tarcia.

2. Charakterystyka stanowiska i warunki badań

Wyznaczanie rozkładu temperatury oraz zmiany wymiarów wywołanej rozszerzalnością termiczną współpracujących elementów może być wykonane na drodze analitycznej. Ze względu na złożoność zachodzących zjawisk konieczne jest stosowanie założeń upraszczających, co prowadzi do uzyskania modeli przybliżonych. Szczególnie trudne jest modelowanie procesów cieplnych w warunkach nieustalonych, zachodzących w początkowym etapie współpracy [2,3,4,5,6]. W niniejszej pracy zaproponowano uproszczoną, empiryczną metodę wyznaczenia poprawki na udział rozszerzalności termicznej w zmianie wymiarów modelowego węzła tarcia trzpień-tarcza. Badania prowadzono przy zastosowaniu testera T-11 produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom-Polska.

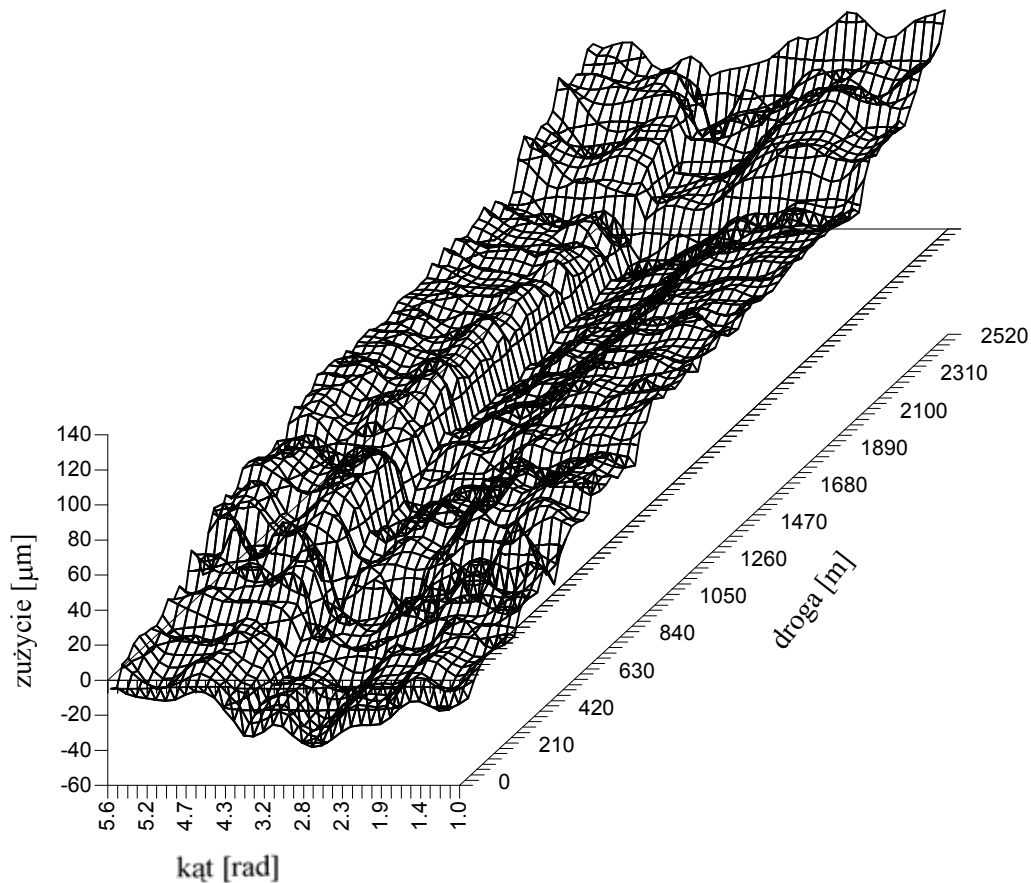
Ciągły pomiar siły wykonywano czujnikiem tensometrycznym typu U1A a pomiar przemieszczenia (zużycia) czujnikiem indukcyjnym typu WT13 firmy HBM-RFN. Pomiar temperatury realizowano przy pomocy termopary płaszczowej NiCr-NiAl firmy Czaki Polska. Termopara była dociśnięta do powierzchni bocznej cylindrycznej próbki w odległości 1[mm] od powierzchni tarcia. W celu obniżenia oporu cieplnego na granicy termopara-próbka zastosowano pastę termoprzewodzącą. Do rejestracji cyfrowej mierzonych wielkości zastosowano rejestrator SPIDER 8 połączony przez port równoległy EPP z komputerem, z wykorzystaniem programu Catman v.3.0.

Dla potrzeb prowadzonych badań wykonano modyfikację testera T-11. Sygnał elektryczny kluczujący do licznika obrotów, pochodzący z testera T-11, po dostosowaniu parametrów elektrycznych, doprowadzono do układu wyzwalającego sekwencję pomiarów w rejestratorze Spider 8. Dobrana częstotliwość próbkowania wynosząca 800[Hz] pozwalała na dokonanie pomiarów każdej z rejestrowanych wielkości co 0.11 radiana w ciągu jednego obrotu tarczy. Sprzętowe wyzwianie sekwencji pomiarów, dzięki zsynchronizowaniu z położeniem kątowym, umożliwiło wykonywanie pomiarów w tych samych położeniach tarczy. Ograniczono w ten sposób wpływ błędów kształtu tarczy oraz drgań układu napędowego na wyniki pomiarów przemieszczenia. Przykładowe przebiegi pomiarów przemieszczenia w funkcji położenia kąowego tarczy oraz drogi tarcia zamieszczono na rys.1. Sekwencje pomiarów powtarzano co 30 sekund.

Nagrzewaniu się głowicy napędowej testera oraz ramienia mocującego próbkę (a co za tym idzie zmianie ich wymiarów) przeciwdziałano stosując chłodzenie zgodnie z ideą zaproponowaną

w pracy [3] polegającą na przepływie cieczy chłodzącej mocowanie próbki i pod obracającą się przeciwpróbką. Dodatkowo nagrzewanie ograniczono dzięki przekładce ceramicznej na styku przeciwpróbki z elementami testera.

Testy tribologiczne prowadzono w układzie trzpień-tarcza w warunkach tarcia technicznie suchego. Trzpień średnicy 4[mm] i długości 12[mm] wykonane był z materiałów badanych, a tarcza o średnicy 20[mm] z żeliwa białego. Przyjęto następujące warunki testu: obciążenie 19.6[N]; prędkość 0.87[m/s]; droga tarcia 3130[m], które pozwoliły na realizację dosyć łagodnego przebiegu zużywania bez gwałtownych adhezyjnych szczytów (praktycznie zużywania ściernego).



Rys. 1. Przeszyczenie w funkcji kąta obrotu tarczy oraz drogi tarcia
Fig. 1. Displacement in versus angle of rotation disk as well as frictional path

Zużycie końcowe wyznaczano wagowo jako zmianę masy próbki i przeciwpróbki oraz liniowo jako zmianę długości próbki oraz głębokość śladu współpracy na przeciwpróbce. Pomiary masy wykonywano na wadze analitycznej z dokładnością 0.2mg, a wymiary liniowe wyznaczano przyrządem Vistronic C1 z czujnikiem indukcyjnym MDKA-E1 produkcji VIS-Polska, z dokładnością 0.4[μm]. Warunki środowiskowe: temperaturę, wilgotność i ciśnienie atmosferyczne rejestrowano termohigrometrem LB-701.

3. Wyniki badań i ich analiza

Testy tribologiczne realizowano w dwóch etapach. Pierwszy polegał na symulowaniu nagrzewania współpracujących podczas tarcia elementów przez doprowadzanie na powierzchnię przeciwpróbki (tarczki) gorącego powietrza i rejestrowaniu przemieszczenia oraz temperatury próbki. Badania prowadzono przy minimalnych naciskach (zapewniających jedynie kontakt między próbką i przeciwpróbką) oraz przy niskiej prędkości ślizgania wynoszącej 0.02 m/s.

Pozwoliło to wyeliminować wpływ zużycia na zmianę wymiarów. Dla każdego zestawu materiałów wykonywano cztery serie pomiarów stosując różne szybkości nagrzewania. Zmiany długości w zależności od zmiany temperatury współpracujących elementów zarejestrowane w tym etapie testu służyły do wyznaczenia poprawki na rozszerzalność liniową. W tym celu metodą najmniejszych kwadratów wyznaczano współczynniki funkcji regresji aproksymującej otrzymane wyniki. Ze względu na nieliniowy charakter obserwowanych zmian przyjęto funkcję drugiego stopnia postaci:

$$l(t) = a_0 + a \cdot (t_x - t_0)^2 + b \cdot (t_x - t_0) + c \cdot [(t_x - t_0) / \Delta\tau]^2 + d \cdot [(t_x - t_0) / \Delta\tau] + e \cdot (t_x - t_0) \cdot \Delta\tau, \quad (1)$$

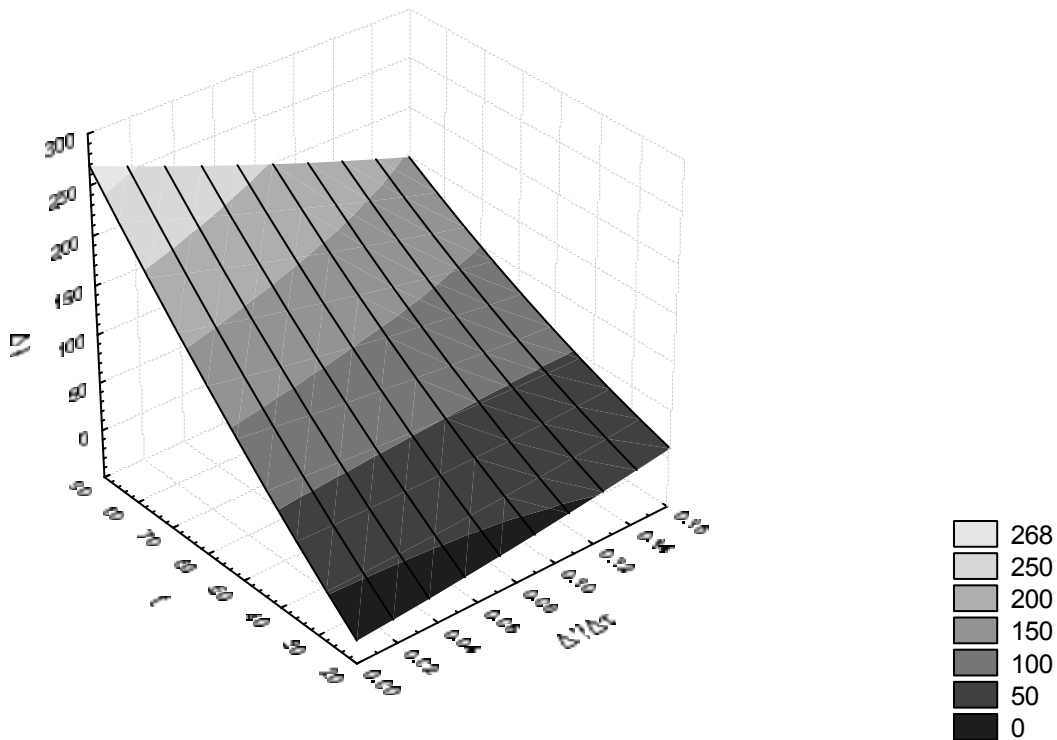
gdzie:

- $\Delta l(t)$ - poprawka na rozszerzalność liniową odpowiadająca przyrostowi temperatury $(t_x - t_0)$,
- t_0 - temperatura początkowa próbki,
- t_x - temperatura próbki w chwili x,
- $(t_x - t_0) / \Delta\tau$ - szybkość zmian temperatury.

Przykładowy wykres poprawki na rozszerzalność liniową przedstawiono na rys. 2.

Wykres powierzchniowy poprawki Δl na rozszerzalność

$$\Delta l = -93.474 + 434.9034 \cdot (\Delta t / \Delta \tau) + 3.1619 \cdot t + 546.2697 \cdot (dt/d\tau) \cdot (\Delta t / \Delta \tau) - 14.2166 \cdot (\Delta t / \Delta \tau) \cdot t + 0.0096 \cdot t^2$$



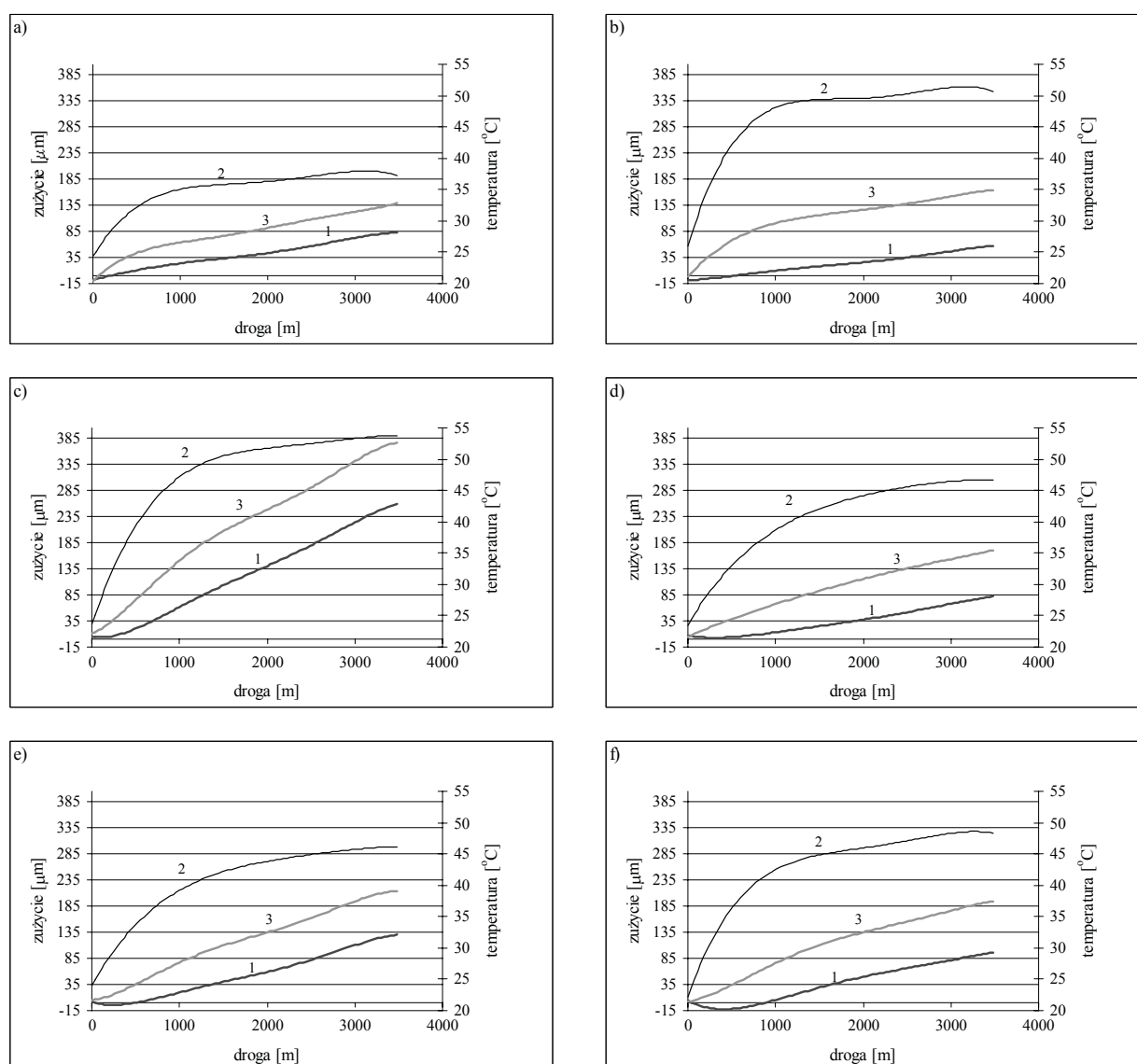
Rys. 2. Poprawka na rozszerzalność liniową w funkcji temperatury i szybkość przyrostu temperatury
Fig. 2. Correction for linear expansion in versus temperature and speed of temperature rise

W drugim etapie prowadzono testy tribologiczne dla tarcia technicznie suchego w warunkach ustalonych (wymienionych wcześniej) dla drogi tarcia wynoszącej 3130[m]. W tym etapie zmiany przemieszczenia (długości) wynikały z dwóch przeciwstawnych procesów: zużycia współpracujących elementów oraz ich wydłużenia na skutek wzrostu temperatury (znacznego szczególnie w początkowym okresie).

Zużycie liniowe skojarzenia z_x obliczano jako sumę wartości przemieszczenia p_x odpowiadającego drodze tarcia x oraz poprawki na rozszerzalność termiczną $\Delta l(t)$ wg. wzoru:

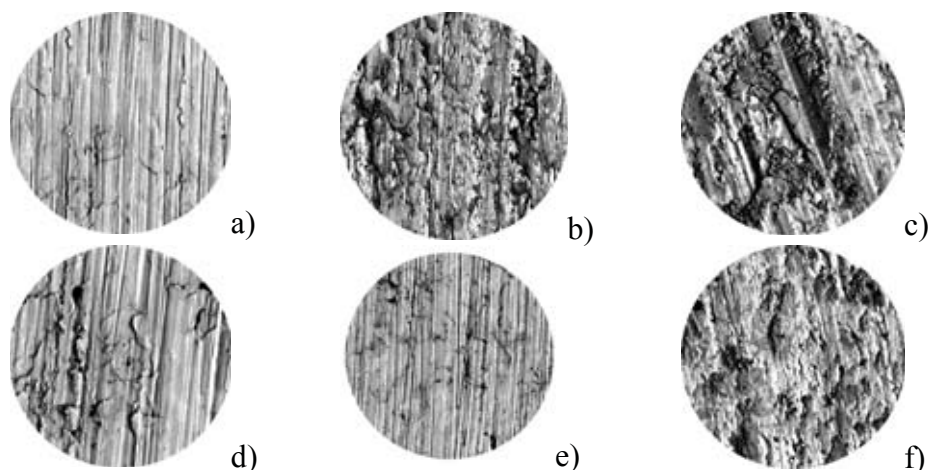
$$z_x = p_x + \Delta l(t). \quad (2)$$

Na Rys.3 przedstawiono zależność zmiany wymiarów, temperatury próbki oraz zużycia liniowego (obliczonego według wzoru 2) od drogi tarcia dla badanych materiałów. Przyjęto oznaczenia: a -tytan węglazotowany, b -stal 50H21G9N4, c –kompozyt FeAl, d –kompozyt NiAl, e –tytan azotowany jarzeniowo, f – tytan azotowany kapielowo. Należy zwrócić uwagę na wzrost wymiarów („ujemne zużycie”) obserwowany w początkowym okresie współpracy, wywołany wzrostem temperatury. Po uwzględnieniu poprawki na rozszerzalność termiczną krzywa zużycia staje się monotoniczna. W oparciu o przedstawione przebiegi wyznaczano obliczeniową wartość całkowitego zużycia liniowego badanych skojarzeń.



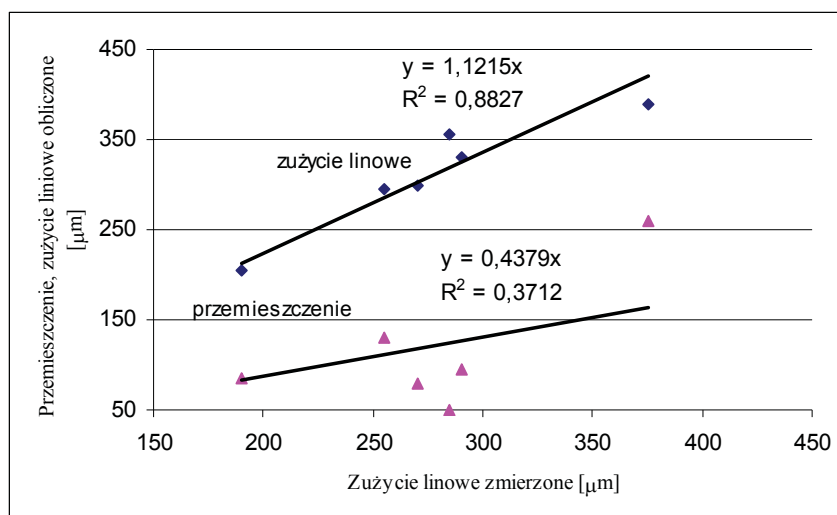
Rys. 3. Przemieszczenie (1), temperatura próbki (3) i zużycie liniowe obliczone (2) w zależności od drogi tarcia dla badanych materiałów

Fig. 3. Displacement (1), temperature sample (3) and linear calculated wear (2) in dependance on wear path for selected materials



Rys. 4. Powierzchnia próbek badanych materiałów po badaniach zużyciowych (oznaczenia jak Rys. 3)
 Fig. 4. Surface of tested sample of materials after wearing research (markings as Fig. 3)

Zamieszczone na Rys. 4 zdjęcia powierzchni próbek po współpracy wykazują, że w niektórych przypadkach zużycie zachodziło nierównomiernie, a niekiedy obserwowano łuszczenie nałożonych warstw. Utrudnia to bezpośredni pomiar zużycia liniowego.



Rys. 5. Porównanie wartości zużycia liniowego zmierzonego i obliczonego
 Fig. 5. Comparison values of measured and calculated linear wear

Analiza zbiorczych wyników zużycia badanych materiałów przedstawiona na Rys.5 wskazuje na istnienie korelacji między zużyciem liniowym skojarzenia wyznaczonym eksperymentalnie a obliczeniową wartością całkowitego zużycia liniowego, natomiast dla przemieszczenia należy uznać, że nie ma takiej korelacji. Zastosowana metoda daje jednak wyniki zawyżone w stosunku do bezpośrednich pomiarów.

4. Podsumowanie

Opisana wyżej metoda pozwala na ciągłą ocenę zużycia w warunkach tarcia technicznie suchego. Dotyczy ona jedynie układu testera T-11 dla przyjętych warunków testu. Jest to próba opracowania prostej, empirycznej metody wyznaczania poprawki na udział rozszerzalności termicznej w zmianie wymiarów węzła tarcia. Podobne podejście można prawdopodobnie

zastosować do innych, nieskomplikowanych węzłów tribologicznych. Należy jednak zauważyć, że ze wzrostem udziału poprawki na rozszerzalność termiczną w obliczonej wartości zużycia liniowego następuje wyraźne pogorszenie zaobserwowanej korelacji. Należy sądzić, że jest to związane z przyjętymi uproszczeniami metody oraz z błędem pomiaru zużycia liniowego, który ma większe znaczenie dla niewielkich wartości zużycia. Niezbędne są zatem dalsze badania pozwalające wyjaśnić te kwestie. Powinny być one ponadto weryfikowane na gruncie teorii wymiany ciepła.

Literatura

- [1] Bojar, Z., Jóźwik, P., Pakowski, C., *Abrasive wear of Ni₃Al-based intermetallic alloy*, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, vol.9, 21–27, 2004.
- [2] Hirsham, A., Abdel-Aal, *Efficiency of thermal energy dissipation in dry rubbing*, Wear vol. 255, 348-364, 2003.
- [3] Kałdoński, T., *Utylitarne i naukowe znaczenie tribologii w budowie i eksploatacji maszyn*, Biuletyn WAT, vol. 603, 5–20, 2002.
- [4] Maciag, A., *Determination method of some physical properties of solid bodies in the process of technical dry friction*, Tribologia vol. 6, 919–925, 1999.
- [5] Sadowski, J., Sadowski, P., *Method of assessment of the friction surface stationary temperature*, Tribologia, vol. 3, 47–60, 2003.
- [6] Yang, L. J., *Wear coefficient equation for aluminum-based matrix composites against steel disc*, Wear vol.255, 579–592, 2003.

