

Tadeusz LEŚNIEWSKI*

**ZUŻYCIE STALI 100Cr6 OKREŚLANE
JEJ TWARDOŚCIĄ I PARAMETRAMI WYMUSZEŃ
W WARUNKACH SMAROWANIA OLEJEM
TRANSOL 150 Z DODATKIEM 3% MoS₂**

**WEAR OF THE 100Cr6 STEEL DETERMINED
ITS HARDNESS AND EXTERNAL INPUT FUNCTIONS
AT LUBRICATION OF TRANSOL 150 WITH ADDITION
OF 3% OF MoS₂**

Słowa kluczowe:

tribologia, odporność na zużywanie, twardość

Key-words:

tribology, resistance to wear, hardness

Streszczenie

W pracy przedstawiono badania tribologiczne, które przeprowadzono planowanym eksperymentem wykorzystując plan rotalny dla trzech zmiennych niezależnych, tj. nacisku p_H , prędkości poślizgu v i twardości

* Politechnika Wroclawska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

kulek H ze stali 100Cr6. Przyjęty zakres twardości (24–62 HRC) odzwierciedla cały zakres twardości stosowanych w budowie przekładni zębatych. Za wielkość wyjściową (kryterialną) eksperymentu przyjęto zużycie kulek określone średnicą śladu wytarcia nieruchomych kulek. Zużycie to mierzono po drodze tarcia $s = 33,4$ m. Kompozycję smarową przygotowano mieszając 3% MoS_2 (określane wagowo) z olejem Transol 150. Testy prowadzono na aparacie czterokulowym. Do matematycznego opisu zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi i wyjściowymi, zmierzonymi podczas eksperymentu zastosowano analizę regresji. Jako funkcji aproksymującej wyniki badań przyjęto wielomian drugiego stopnia ze współdziałaniem pierwszego rzędu. Opracowano funkcję zużycia $d = f(p_H, v, H)$ dla skojarzeń ślizgowych pracujących przy styku skoncentrowanym punktowym. Zauważono istotny wpływ twardości na zużycie kulek. Stwierdzono, że związek ten nie jest jednoznaczny ale ściśle uzależniony od charakteru parametrów wymuszeń. Powiązanie twardości z wymuszeniami zewnętrznymi pozwoliło zaobserwować, że otrzymana funkcja $d = f(p_H, v, H)$ nie jest monotoniczna, lecz posiada ekstremum.

WPROWADZENIE

Aby zapewnić właściwą pracę maszyn, na węzły trące nakłada się kryteria: minimum tarcia i zużycia oraz maksimum trwałości i bezpieczeństwa. Najlepiej te kryteria realizowane są w zakresie tarcia płynnego, jednak w maszynach roboczych i w pojazdach często występuje tarcie mieszane. Niezwykle istotne jest tu zastosowanie odpowiedniego środka smarnego oraz materiałów na trące się elementy. Dobór cech konstrukcyjnych elementów zespołów maszynowych, poddanych różnym obciążeniom, odbywa się na podstawie danych charakteryzujących własności fizyczne, chemiczne i mechaniczne przyjmowanych materiałów. Jednak w wypadku węzłów ślizgowych zagadnienie to jest skomplikowane z powodu bardzo wielu parametrów wpływających na procesy tribologiczne. Duża liczba parametrów wpływających na proces zużywania oraz swoboda ich doboru poprzez prowadzących badania powoduje to, że dotychczas nie zbudowano ogólnego modelu matematycznego tarcia mieszane-go. Nie można więc prognozować trwałości węzłów pracujących w tym obszarze tarcia bez przeprowadzania badań doświadczalnych. Dodatkowym utrudnieniem jest przyjmowanie do analiz stałej wartości twardości

materiału i wymuszeń (tj. stałego nacisku lub prędkości poślizgu), a nie rozważanie ich wpływu w przedziałach ich stosowności. Prowadzić to może do błędów w czasie analizy wyników i powodować znaczne rozbieżności u kolejnych badaczy.

W Zakładzie Podstaw Konstrukcji Maszyn i Tribologii Politechniki Wrocławskiej od dawna podejmowane są próby stworzenia możliwości określenia charakterystyk tribologicznych materiałów na węzły ślizgowe poprzez stworzenie ogólnej funkcji celu wiążącej wartości wymuszeń zewnętrznych (nacisku p_H i prędkości v) z cechami łożyska (twardością H) przy działaniu określonego środka smarnego. Prezentowana praca jest kontynuacją wcześniej omawianych wyników [L. 1–3].

METODA I WARUNKI BADAŃ

W celu określenia wpływu twardości na właściwości tribologiczne materiałów na węzły trące wykonano badania przy użyciu kompozycji smarnej składającej się z oleju Transol 150 z dodatkiem 3% MoS₂. Badania prowadzono na standardowym aparacie czterokulowym produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu. Do realizacji zadania wykorzystano metodę planowanego eksperymentu. Badania prowadzono wg założonego rotatabilnego planu badań dla trzech niezależnych zmiennych wejściowych: nacisku średniego Hertza p_H , prędkości poślizgu v , twardości materiału ślizgowego H .

O wyborze tych wielkości decydował cel badań oraz kryterium, że zbiór wielkości wejściowych oraz wyjściowych tworzyć mogą tylko wielkości dające określić się ilościowo. Przyjęty środek smarny (olej Transol 150 + 3% MoS₂) oraz kształt, materiał, wymiary i chropowatość próbek traktowane były jako wielkości stałe. Zastosowany plan badań daje stałość oszacowania funkcji regresji. Spełnione jest wtedy wymaganie, aby wariancja była taka sama w punkcie centralnym planu, jak i w punktach leżących na kuli o promieniu $\rho = 1$.

Przy ustalaniu zakresu wielkości wejściowych kierowano się kryterium, wg którego obiekt badań musi prawidłowo funkcjonować we wszystkich układach wartości wielkości wejściowych i nie ulegać zatarciu. W związku z tym, na podstawie badań wstępnych ustalono następujące przedziały wartości dla poszczególnych zmiennych:

- średni nacisk Hertza p_H – od 2600 do 4000 MPa, któremu odpowiada obciążenie nadane F z zakresu od 55,4 do 201,8 daN,
- prędkość poślizgu v – od 0,12 do 0,68 m/s, równoznaczna prędkości obrotowej kulki n z zakresu od 312,7 do 1772,2 obr/min.

Trzecią zmienną wejściową przyjętą do budowy modelu była twardość materiału z zakresu 24–62 HRC. Rozważany zakres obejmuje wszystkie wartości twardości stosowanych w budowie przekładni zębatych.

Wielkością wyjściową było zużycie, mierzone średnicą śladu wytarcia nieruchomych kulek. Zużycie to mierzono po drodze tarcia $s = 33,4$ m. Pomiaru zużycia kulek dokonywano w kierunku równoległym i prostopadłym do śladu zużycia. Ślady mniejsze od 1 mm mierzono pod mikroskopem z dokładnością do 0,01 mm, a pozostałe za pomocą lupy z dokładnością do 0,1 mm. Testy powtarzano pięciokrotnie dla każdego punktu pomiarowego. Wyniki opracowano statystycznie przy poziomie ufności 95% stosując test *t*-Studenta.

Na podstawie zrealizowanych badań wyznaczono funkcję celu pozwalającą prognozować charakterystyki tribologiczne stalowych materiałów na węzły ślizgowe poprzez średnicę zużycia kulek.

MATERIAŁY I ICH CHARAKTERYSTYKA

Do badań użyte były materiały:

1. Olej Transol 150 – środek stosowany przeważnie (wg danych dystrybutora) do średnio- i wysokoobciążonych przekładni zębatych często przenoszących obciążenia uderzeniowe. Stosowany m.in. do urządzeń walcowniczych, maszyn budowlanych, podnośników i urządzeń przedładunkowych, w obrabiarkach etc. Otrzymywany z selektywnie rafinowanych olejów mineralnych, zawiera szereg dodatków poprawiających własności smarne, przeciwkorozyjne, odporność na utlenianie, przeciwpienne i demulgujące. Olej Transol może być stosowany w przypadkach, gdy przekładnie narażone są na agresywne działanie środowiska (para wodna, gazy korozyjne) oraz na zmienne temperatury otoczenia (dźwigi, wciągarki itp.).
2. Kulki łożyskowe – średnica 12,7 mm, wykonane ze stali łożyskowej ŁH15 w 16 klasie dokładności i grupie wymiarowej $S = 0$ μm . Kulki odpuszczane były na wymagane twardości z przedziału 24 do 62 HRC.
3. Proszek MoS_2 naturalny o granulacji do 5 μm . Przyjętą ilość dodatku uzasadnia praca [L. 4], gdzie 3% przyjętego napełniacza w smarze tworzy już wysokoefektywną kompozycję smarną.

WYNIKI BADAŃ

Chcąc powiązać wielkości wejściowe z wyjściowymi (zmierzonymi podczas eksperymentu), stworzono pomiędzy nimi zależności matematyczne.

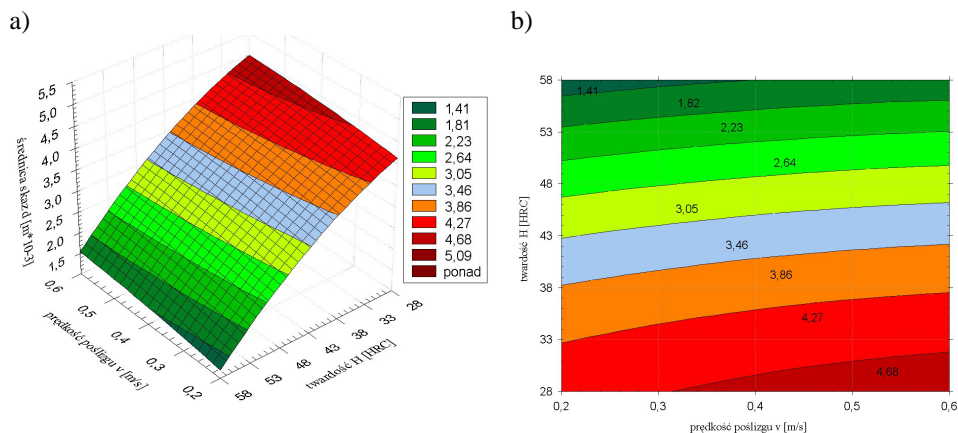
Wykorzystano w tym celu analizę regresji. Za funkcję aproksymującą wyniki badań przyjęto wielomian drugiego stopnia ze współdziałaniem pierwszego rzędu.

Na podstawie przeprowadzonych badań otrzymano funkcję regresji:

$$d = 0,004115344 p_H + 7,460785243 v - 0,233350319 H - 7,1473 \cdot 10^{-7} p_H^2 + -8,219255917 v^2 + 4,09843 \cdot 10^{-5} p_H H$$

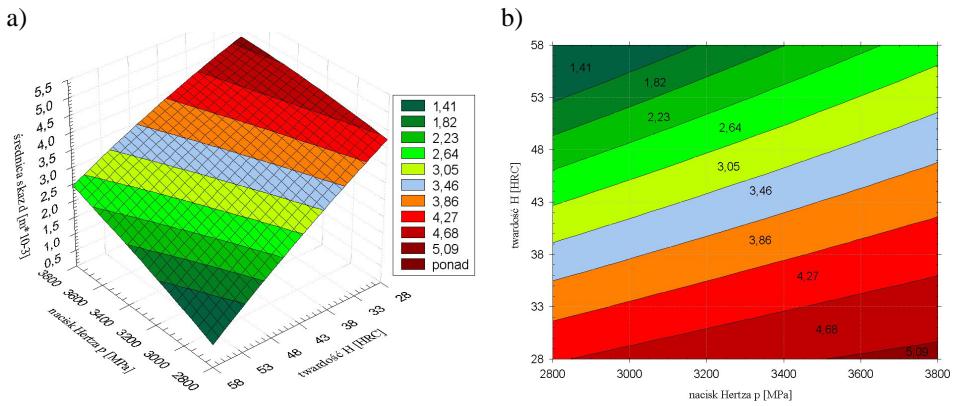
W celu oszacowania rozbieżności pomiędzy wartością wyjściową zmierzoną w eksperymencie a wartością wyjściową prognozowaną z modelu określono współczynnik korelacji wielowymiarowej, który wynosi $R = 0,99580685$. Wysoka wartość współczynnika świadczy o dużej zależności pomiędzy wartościami zużycia zmierzonymi w czasie eksperymentu a wartościami otrzymanymi wg przedstawionej funkcji.

Prezentowana funkcja pokazuje wpływ twardości materiału i wielkości wymuszeń na zużycie kulek. Bezsprzecznie zaznaczona jest tu istotna rola twardości. Aby ułatwić analizę na **Rys. 1, 2 i 3** przedstawiono funkcję graficznie. Z uwagi na dużą ilość wykresów i ich podobieństwo, **Rys. 1, 2 i 3** przedstawiają przykładowe przebiegi dla wybranych wartości z przyjętego przedziału zmiennych wejściowych.



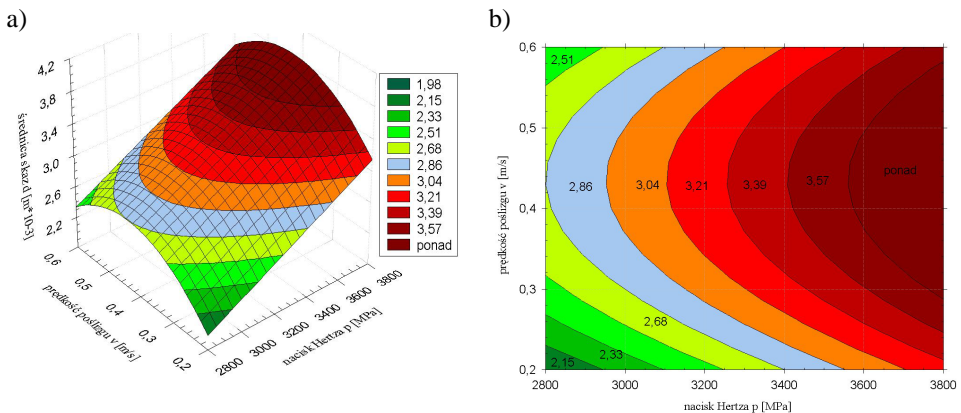
Rys. 1. Zależność $d = f(v, H)$ przy $p_H = 3300$ MPa dla oleju Transol 150 + 3% MoS₂: a) wykres przestrzenny, b) wykres warstwowy

Fig. 1. Relationship $d = f(v, H)$ at $p_H = 3300$ MPa for a Transol 150 + 3% MoS₂: a) spatial diagram, b) contour diagram



Rys. 2. Zależność $d = f(p_H, H)$ przy $v = 0,4$ m/s dla oleju Transol 150 + 3% MoS₂: a) wykres przestrzenny, b) wykres warstwiczny

Fig. 2. Relationship $d = f(v, H)$ at $v = 0,4$ m/s for a Transol 150 + 3% MoS₂: a) spatial diagram, b) contour diagram



Rys. 3. Zależność $d = f(p_H, v)$ przy $H = 43$ HRC dla oleju Transol 150 + 3% MoS₂: a) wykres przestrzenny, b) wykres warstwiczny

Fig. 3. Relationship $d = f(v, H)$ at $H = 43$ HRC for a Transol 150 + 3% MoS₂: a) spatial diagram, b) contour diagram

Rysunek 1 przedstawia zależność zużycia kulek w funkcji prędkości poślizgu v i twardości H ($d = f(v, H)$) dla średniego nacisku Hertza $p_H = 3300$ MPa. **Rysunek 2** – średnicę skaz kulek w funkcji średniego nacisku Hertza p_H i twardości H ($d = f(p_H, H)$) dla prędkości poślizgu $v = 0,4$ m/s. Natomiast wykres 3 ilustruje tę samą zależność, lecz w funkcji prędkości poślizgu v i nacisku średniego p_H ($d = f(v, p_H)$) dla twardości $H = 43$ HRC.

Analizując otrzymane wykresy zauważono, że w całym zakresie przyjętych wielkości wejściowych zachodzi silna korelacja pomiędzy zużyciem d tych powierzchni a ich twardością H . Ograniczona objętość artykułu nie pozwala na pełną analizę, ale na przedstawionych rysunkach widoczny jest wyraźny wzrost odporności na zużycie wraz ze wzrostem twardości. Związek ten nie jest jednoznaczny, ale ściśle powiązany z parametrami wymuszeń (nacisku Hertza p_H i prędkości poślizgu v), działających na węzeł ślizgowy.

PODSUMOWANIE

Zaprezentowano wyniki badań dotyczących wpływu twardości skojarzonych stalowych powierzchni ślizgowych na ich zużycie. Wielkość ta została powiązana z parametrami wymuszeń, tj. prędkością poślizgu i naciskiem. Eksperyment przeprowadzono przy styku skoncentrowanym punktowym z wykorzystaniem planu rotalnego na pięciu poziomach dla trzech zmiennych wejściowych, tj. twardości z przedziału 24 do 62 HRC, nacisku Hertza: 2600 do 4000 MPa i prędkości poślizgu: 0,12 do 0,68 MPa, w warunkach tarcia mieszanego przy smarowaniu olejem Transol 150 z dodatkiem 3% MoS₂. Na podstawie badań eksperymentalnych zbudowano model uzależniający zużycie od wspólnego wpływu wymienionych parametrów. Uzyskana zależność (funkcja regresji) przedstawia wyraźny wpływ twardości na zużycie w zakresie tarcia mieszanego. Funkcja ta nie jest monotoniczna, lecz posiada ekstremum. Na rysunkach widoczny jest wyraźny wzrost odporności na zużycie wraz ze wzrostem twardości. Postać funkcji i charakter zmian poziomic $d = \text{const}$ pokazuje optimum funkcji zależne od powiązania twardości z parametrami wymuszeń (p_H i v).

LITERATURA

1. Krawiec S., Leśniewski T.: Korelacja twardości materiału i jego właściwości tribologicznych, Tribologia, nr 4, 2002.
2. Leśniewski T., Krawiec S.: The effect of ball hardness on four-ball wear test results, Wear, volume 264, issues 7–8, 2008.
3. Leśniewski T., Krawiec S.: Korelacja twardości stali 100Cr6 i jej zużycia w warunkach smarowania olejem Transol 150 z dodatkiem 3% grafitu, Tribologia, nr 2, 2006.

4. Krawiec S.: Wpływ synergizmu wybranych napełniaczy w smarze na zwiększenie trwałości ślizgowych węzłów maszyn, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1998.

Recenzent:
Remigiusz MICHALCZEWSKI

Summary

Tribological investigations, which were carried out using a rotatable plan for three independent variables (pressure p_H , sliding velocity v , and ball hardness H made of 100Cr6 steel), are presented in this paper. The assumed range of the hardness (24 – 62 HRC) reflects the whole area of the hardness applied in the construction of the toothed gear. The diameter of the ball wear marks was accepted as the output criterion of the experiment with the friction path equal to 33.4 meters. Lubricants were made by mixing of 3% of MoS₂ (determine by weight) with oil Transol 150. The tests were carried out using a 4-ball apparatus. The results of these experiments (input vs. output) were evaluated using regression analysis. A quadratic polynomial was employed as the approximation function. The wear function $d=f(p_H, v, H)$ for sliding nodes working with concentrated contact point was worked out. Significant influence of the magnitude on wear was reported. It was found that this relation is ambiguous and depends on external input function. The binding of hardness together with external input function shows that the obtained function $d = f(p_H, v, H)$ is not monotonic but has an extremum.