

ENERGETYCZNE ZAGADNIENIA PRACY ŁOŻYSKOWAŃ IGIEŁKOWYCH

Jerzy NACHIMOWICZ*, Robert KORBUT*

*Katedra Budowy i Eksploatacji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka,
ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

nachim@pb.edu.pl, robert.korbut@gmail.com

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę równania zużycia w ujęciu energetycznym na przykładzie łożyskowania igiełkowego wału głównego skrzyni biegów ciągnika rolniczego. Przeanalizowano wpływ zewnętrznych oddziaływań na charakter zużycia w funkcji czasu w węzle tarciovym. Właściwości, którymi charakteryzują się zdeformowane obszary powierzchni tarcia mają zasadniczy wpływ na trwałość elementów pary tarcia. Konieczny jest prawidłowy wybór materiałów na elementy tarciove, charakteryzujące się strukturą o największej odporności na pęknięcie pod wpływem eksploatacyjnych oddziaływań zewnętrznych. Oznacza to, że materiałoznawstwo tribotechniki powinno być rozpatrywane na bazie analizy mikrostruktur.

1. WSTĘP

Genezą konstrukcji łożysk tocznych był powszechny pogląd, że straty tarcia przy toczeniu są nieporównywalnie mniejsze niż przy ślizganiu. Niemniej jednak istnieją one podczas tarcia tocznego i ślizgowego, a powodowane są przez różne niżej wymienione źródła:

- histerezę odkształceń,
- tarcie wewnętrzne w środku smarującym,
- poślizg i mikroślizg wywołany odkształceniami, geometrią styku, ruchem spowodowanym momentem giroskopowym,
- poślizg między koszykiem a częściami tocznymi i pierścieniem,
- poślizg w uszczelnieniach.

W rzeczywistych warunkach ciał odkształcalnych zjawisko czystego toczenia występuje w przypadku, gdy obydwie współpracujące części mają taką samą średnicę, długość, właściwości materiału oraz równoległe osie obrotu. Także chropowatości powierzchni powinny być możliwie małe. W tych warunkach przy braku środka smarnego występują jedynie straty histerezy odkształceń. Wynika to z faktu, że różnica długości łuku styku i odpowiadających mu łuków przed odkształceniem jest jednakowa dla obu ciał. Wskutek tego w strefie odkształceń nie występuje wzajemne ślizganie się powierzchni.

Jeśli krzywizny współpracujących powierzchni są różne, przy sprężystym ugięciu długość łuku styku obu ciał jest jednakowa, podczas gdy przed ugięciem była ona różna. W rezultacie w strefie styku odkształceniom towarzyszy mikroślizg, jeżeli jednak prędkości obydwu współpracujących powierzchni są jednakowe, wzajemny ich ruch jest nazywany toczeniem.

Przypadkiem klasycznym, gdy przy toczeniu się dwóch ciał ich prędkości obwodowe są różne, występuje toczenie z poślizgiem, ta właśnie sytuacja jest przedmiotem badań, a celem będzie ustalenie udziału tarcia poślizgu w ogólnym bilansie oporów ruchu.

2. ENERGETYCZNA TEORIA TARCIA I ZUŻYCIA

Równanie zużycia, przedstawione w postaci energetycznej opisuje realne procesy, przebiegające przy różnych zewnętrznych oddziaływań na materiały, prowadzących do ich zniszczenia i tworzenia produktów zużycia. Wyściowa postać energetycznego podejścia do procesów zużycia się przedstawia się następująco:

$$E_{y\partial} = A_{wn} / V, \quad (1)$$

gdzie: $E_{y\partial}$ – energia właściwa zużywającego się materiału o objętości V w chwili powstania produktów zużycia, A_{wn} – praca sił zewnętrznych, działających na objętość w ciągu okresu czasu t lub przy liczbie N cykli (uderzeń) obciążenia.

Wiadomo, że

$$A_{wn} = A_i N = A_i \omega t, \quad (2)$$

gdzie: A_i – zewnętrzna praca przy pojedynczym obciążeniu objętości V , ω – częstość obciążenia.

Z relacji (1) i (2) wynika równanie zużycia się w następującej postaci:

$$V = \frac{A_i}{E_{y\partial}} \omega t, \quad (3)$$

Wyrażenie (3) opisuje zużycie, kiedy produkty zużycia powstają równomiernie w czasie, tj. zużycie liniowe.

Dla nieliniowego zużycia:

$$V = \frac{A_i}{E_{y\partial}} f(\omega t), \quad (4)$$

gdzie: funkcja $f(\omega t)$ może być przedstawiona (oprócz liniowej) jako potęgowa, wykładnicza, logarytmiczna i inną zależnością.

Przy dynamicznym charakterze obciążenia (uderzeniowym, hydrościernym, kawitacyjnym zużyciu) wyrażenie (4) powinno uwzględniać prędkość uderzenia:

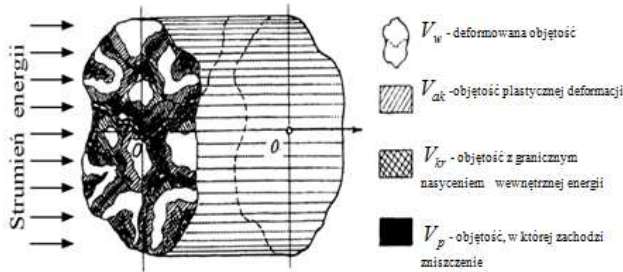
$$V = \frac{A_i \vartheta_i}{E_{y\delta} \vartheta_{kr}} f(\omega t), \quad (5)$$

gdzie: ϑ_i – średnia wartość prędkości obciążenia udarowego, ϑ_{kr} – krytyczna prędkość uderzenia, powodująca zniszczenie zużywanego materiału, $A_i \vartheta_i$ – strumień energii, wprowadzony do materiału przy oddzielnym uderzeniu, $E_{y\delta} \vartheta_k$ – krytyczna gęstość strumienia energii odkształcenia – krytyczna gęstość mocy odkształcenia.

Oznaczając $A_i \vartheta_i = w_i$ i $E_{y\delta} \vartheta_k = W_{kr}^*$, zapiszemy

$$V = \frac{w_i}{W_{kr}^*} f(\omega t). \quad (6)$$

Licznik i mianownik tego równania upraszcza się po uwzględnieniu osobliwości konkretnego typu zużywania się. Strumień energii zewnętrznej w_i powinien być wyrażony przez siłę tarcia przy tarcu zewnętrznym. Model rozdziału energii plastycznej deformacji przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Schemat rozdziału strumienia energii w deformowanej objętości

Kryterium odporności na zużycie W_{kr}^* powinno uwzględniać właściwości materiałów (mechaniczne, fizyczne, chemiczne i inne), mające wpływ na zniszczenie w konkretnych warunkach zewnętrznego oddziaływania. Konkretna wartość W_{kr}^* zależy od charakteru obciążenia zewnętrznego i przyjmuje wartości uśrednione w zużytej objętości (* – oznaczenie uśrednienia).

Przedstawiając ϑ_{kr} w postaci sumy składowych sprężystej i plastycznej deformacji, odpowiednio ϑ_{kr}^{spr} i ϑ_{kr}^{pl} , otrzymamy:

$$W_{kr}^* = \frac{1}{3} E_{y\delta}^* \vartheta_{kr}^* = \frac{1}{3} E_{y\delta}^* (\vartheta_{kr}^{spr} + \vartheta_{kr}^{pl}). \quad (7)$$

Właściwą energię odkształceń $E_{y\delta}^*$, nieodwracalnie pochłoniętą przez materiał w chwili powstawania produktów zużycia, można wyznaczyć przykładowo wg wykresu wytrzymałości lub twardości jako pole powierzchni pod krzywą $\sigma(e_i)$ lub $H(e_i)$, ograniczoną z prawej strony deformacją zniszczenia e_p , wyznaczoną w konkretnych warunkach zużywania się, metodą pomiaru mikrotwardości bezpośredniego na zużytej powierzchni materiału.

Składowa sprężysta ϑ_{kr}^{spr} w wyrażeniu (7) określa się prędkością fali sprężystej deformacji c_0 i sprężystej deformacji e_{spr}

$$\vartheta_{kr}^{spr} = c_0 e_{spr} = \sqrt{\frac{E}{\rho_M}} e_{spr}^2, \quad (8)$$

gdzie: E – moduł sprężystości, ρ_M – gęstość zużywającego się materiału. Składowa plastyczna ϑ_{kr}^{pl} w (7) zależy od prędkości fali deformacji plastycznej c_{pl} i skumulowanej przy zużywaniu się sumarycznej deformacji plastycznej.

$$\vartheta_{kr}^{pl} = \int_{e_{spr}}^{e_p} c_{pl} de = \int_{e_{spr}}^{e_p} \left(\frac{d\sigma/de}{\rho_M} \right)^{0.5} de, \quad (9)$$

gdzie: $d\sigma/de$ – lokalne nachylenie stycznej do krzywej rozciągania (ściskania), sporządzonej we współrzędnych naprężenie – odkształcenie ($\sigma - e$).

Wyrażając prawe strony wzorów (8) i (9) jako energię kruchego E_{kr} i plastycznego E_{pl} zniszczenia, otrzymamy

$$\vartheta_{kr} = \sqrt{\frac{2E_{kr}}{\rho_M}} + \sqrt{\frac{2E_{pl}}{\rho_M}}, \quad (10)$$

gdzie: $E_{kr} = \sigma_b^2/2E$, $E_{pl} = (\sigma_b - \sigma_T)^2/2D$, σ_b , σ_T – wytrzymałość materiału i granica plastyczności, D – moduł umocnienia (tg kąta nachylenia stycznej do krzywej $\sigma(e)$ w zakresie deformacji plastycznych, przy liniowym charakterze deformacyjnego umocnienia materiału). Krytyczna prędkość uderzenia, związana z osobliwościami rozprzestrzeniania w materiałach zużywających się, sprężystych i plastycznych fal deformacji, charakteryzuje odporność na zużycie materiałów przy dynamicznym wysoko prędkościowym obciążeniu i może być wyrażona przez wytrzymałościowe charakterystyki zużywających się objętości, tak to następujące z wyrażen (8) – (10).

Analiza danych doświadczalnych pokazuje, że w warunkach rozciągania przy uderzeniu (uderzenie w powierzchnię czołową pręta) między ϑ_{kr} i σ_b istnieje zależność potęgowa

$$\vartheta_{kr} = const \sigma_b^n, \quad (11)$$

gdzie: $n = 2.5$ dla stali z $\sigma_b \leq 500$ MPa, $const.$ – stała wyznaczona doświadczalnie, uwzględniająca konkretne warunki eksperymentu, lub współczynnik proporcjonalności między rozpatrywanymi charakterystykami.

Uwzględniając (11) kryterium odporności na zużycie dla stopów na osnowie żelaza z $\sigma_b \geq 500$ MPa okaże się proporcjonalnym ϑ_{kr} i σ_b do sześciastu.

$$W_{kr}^* \approx const \vartheta_{kr}^3 \approx const \sigma_b^3 \quad (12)$$

Poszczególne zależności (12) przedstawiają znaczące praktyczne zainteresowania z punktu widzenia prognozowania zużycia materiałów i powłok. Podstawiając wyrażenie (10) do równania (7) otrzymamy:

$$W_{kr}^* = \frac{1}{3} E_{y\delta}^* \left(\sqrt{\frac{2E_{kr}}{\rho_M}} + \sqrt{\frac{2E_{pl}}{\rho_M}} \right). \quad (13)$$

W tym wyrażeniu ogólna energochłonność materiału $E_{y\delta}^*$ i jej składowe E_{kr} i E_{pl} można wyznaczyć według wykresu mikrotwardości (wytrzymałości). Jeżeli wymienione wykresy twardości lub wytrzymałości nie są możliwe do wyznaczenia, to ocena odporności na zużycie materiałów przy udarowym zewnętrznym działaniu jest możliwa w wyniku przeprowadzenia analogii do kryterium W_{kr}^* . Przy tym obserwuje się w tym stanie, że przy obniżeniu

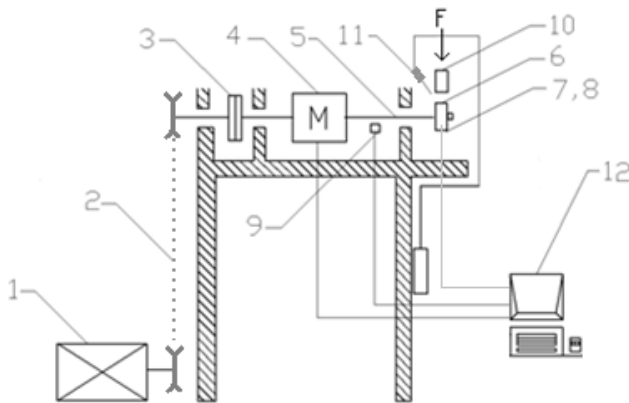
szywnego uderzeniowego obciążenia i zbliżeniu warunków zewnętrznego (siłowego) oddziaływania do statycznych, kryterium W_{kr}^* będzie przyjmować bardzo proste postacie. Na przykład może wyrażać się obniżaniem wskaźnika w potęgę przy ϑ_{kr} i σ_b lub twardości (12) (Nachimowicz i Kaczyński, 2003; Nachimowicz, 2004, Nachimowicz i Chulkin, 2002).

3. WYNIKI BADAŃ

Badania były prowadzone na stanowisku badawczym, którego widok przedstawiono na Rys. 2, a jego schemat z aparaturą pomiarową na Rys. 3.



Rys. 2. Stanowisko badawcze – węzeł tarcowy: a – nakładka na czop wału, b – łożysko, c – iglica dozująca środek smarny, d – ramię, przez które przekazywane jest obciążenie



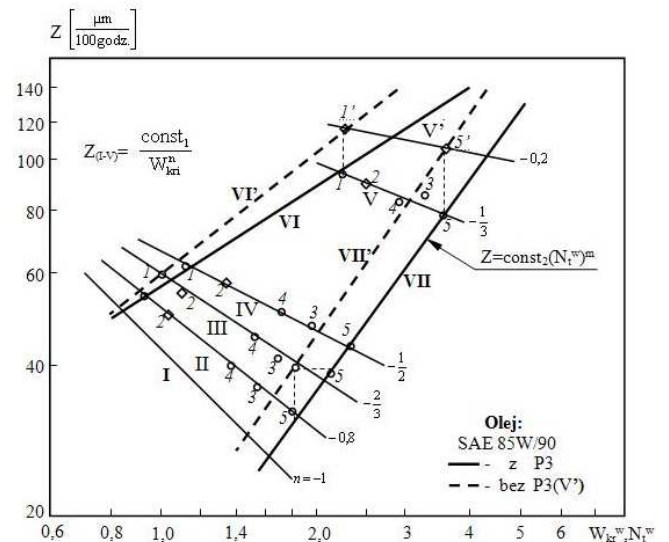
Rys.3. Schemat stanowiska badawczego: 1 – silnik elektryczny, 2 – przekładnia pasowa 3 – sprzęgło, 4 – momentomierz, 5 – czop wału o średnicy D , 6 – igielka łożyska o średnicy d , 7 – czujnik obrotów n_2 igielki względem jej osi symetrii, 8 – czujnik obrotów n_3 igielki wokół osi wałka, 9 – czujnik obrotów n_1 wałka, 10 – ramię obciążające próbkę promieniowo, 11 – iglica wprowadzająca środek smarny do układu, 12 – komputer z przetwornikiem do zapisu danych

Stanowisko badawcze (Rys.3) składa się z silnika elektrycznego (1) o płynnej regulacji prędkości obrotowej w zakresie 0–1500obr/min połączonego z wałkiem za pomocą przekładni pasowej (2), sprzęgła (3), momentomierza (4) zapewniającego ciągły pomiar momentu tarcia, czujnika obrotów: wałka (9), igielki wokół osi wałka (8) i jej osi

symetrii (7), ramienia (10) zapewniającego zadawanie obciążenia F na łożysko, iglicy wprowadzającej środek smarny do układu (11), oraz komputera z przetwornikiem do zapisu danych (12). Łożysko igielkowe z unieruchomionym pierścieniem zewnętrznym jest osadzone na nakładce zamontowanej na czopie wału i obciążone promieniową siłą F . Silnik i wał połączone są za pomocą przekładni pasowej. Silnik napędza czop wału do określonej prędkości, a następnie czujniki obrotów i momentomierz rejestrują odpowiednio prędkości obrotowe wałka i igielki oraz moment tarcia. Badanie łożysk o zmiennych średnicach wewnętrznych jest możliwe dzięki zastosowaniu wymiennych nakładek o różnej średnicy montowanych na czopie wałka. Nakładki te mogą również służyć do regulacji luzu wyjściowego w węźle tarcowym

Na Rys. 2 przedstawiono zależności wpływu kryterium energetycznego na zużycie czopa wału w funkcji zmiany materiału i parametrów smarnych ośrodka.

Analiza danych doświadczalnych pokazuje, że przy ogólnym kryterium odporności na zużycie materiałów przy zewnętrznym tarcu występuje uśredniona, w zużytych objętościach, krytyczna gęstość mocy tarcia W_{kr}^* .



Rys. 4. Intensywność zużycia czopa wału – kryterium energetyczne: N_1^w –względna gęstość mocy tarcia; W_{kr}^w –względna krytyczna gęstość mocy odkształcenia; czop wału: 1 – 16MnCr5, 2 – 20MoCrS4 + nawęglanie (0,6mm); napawany: 3 – 80G; 4 – 35X5M1,5; 5 – 50X10GC1,5; P3 – dodatek do oleju Acorox 88, naciski powierzchniowe 950MPa, $n=1500 \text{ min}^{-1}$, łożysko igielkowe K40 × 45 × 17

Jeżeli na procesy tworzenia różnorodnego rodzaju wtórnych struktur i produktów zużycia znaczący wpływ mają reakcje chemiczne, powierzchniowo – aktywna substancja i inne czynniki, to ustalenie w tych warunkach dostatecznej niezawodności kryteriów odporności na zużycie okazuje się trudnym problemem, na przykład, przy mało intensywnym utleniającym zużyciu tribopowłóczenia. Kryteriami odporności na zużycie w takich warunkach mogą okazać się: gęstość dyslokacji w cienkiej warstwie powierzchniowej materiału, energia aktywacji reakcji chemicznych i charakterystyki wytrzymałościowe (Nachimowicz i Jałbrzykowski, 2008; Nachimowicz i Pogodaev, 2002).

4. PODSUMOWANIE

Wykaz kryteriów odporności na zużycie materiałów – niezmienniki uniwersalnego kryterium W_{kr}^* (krytyczna gęstość mocy deformacji) świadczy o dużej różnorodności i złożoności procesów powierzchniowego zniszczenia materiałów.

Należy zauważyć, że całokształt właściwości, którymi charakteryzują się zdeformowane obszary materiałów w chwili ich zniszczenia (początek tworzenia produktów zużycia) ukazuje reakcje tych obszarów na zewnętrzne oddziaływanie. Po to, aby skierować te reakcje w żądanym kierunku, w tym przypadku – zapewnić wysoką odporność na ścieranie (długotrwałość) elementów, konieczny jest prawidłowy wybór znanych materiałów lub wytwarzać nowe, charakteryzujące się strukturą o największej odporności na pękanie wywołanych oddziaływaniem zewnętrznych (eksploatacyjnych) czynników. Oznacza to, że materiałoznawstwo problemów tribotechniki powinno być rozwiązywane na bazie analizy mikrostruktur.

LITERATURA

1. **Nachimowicz J.** (2004,) Tribological characteristics of bearing system of road wheels, *International Conference "Friction 2004". Modelling and simulation of the friction phenomena in the physical and technical systems.* Warsaw University of Technology, 59-63.
2. **Nachimowicz J., Chulkin S.** (2002), The comprehensive approach to problem solving on a heightening of longevity both endurance of materials and elements of machines, *Mechanical Engineering*, Vol. 4, 42-44.
3. **Nachimowicz J., Jałbrzykowski M.** (2008), Selected energetic aspects of needle bearings work performance, *Machine Dynamics Problems*, Vol. 32, No 1, 73-96.
4. **Nachimowicz J., Kaczynski R.** (2003), On the criteria of the influence of the lubrication medium on the durability of ball bearings, *Mechanical Engineering*, Vol. 12, 49-52.
5. **Nachimowicz J., Pogodaev L.I.** (2002), *Modelirovanie processa iznašivaniija i prognozirovanie dolgovečnosti oporkačeniija*, Izd. SPBGU, s.129 Sankt-Peterburg.

ENERGETIC ASPECTS OF NEEDLE BEARINGS WORK PERFORMANCE

Abstract: The paper presents the analysis of wear equation in energetic approach exemplified by a needle bearing of tractors third motion shaft. The authors analysed the influence of external factors on the type of wear in the function of time in frictional contact. Properties which are typical of deformed sections of friction surface have essential influence on the durability of the elements of friction couple. It is crucial to make the right choice of materials for friction elements which ought to have structure of the largest resistance to cracking as a result of external exploitation influences. This means that the material science of tribotechnology should be considered on the basis of microstructure analyses.