

Jacek SPAŁEK

## WPLYW SMAROWANIA NA TRWAŁOŚĆ PRZEKŁADNI ZĘBATYCH

**Streszczenie.** W opracowaniu przedstawiono wybrane problemy wpływu jakości smarowania na trwałość tribologiczną warstwy wierzchniej ząbów kół zębatach i łożysk. W szczególności zaprezentowano uogólnione ujęcie trwałości tribologicznej jako funkcji parametru tarcia oraz stopnia czystości środka smarnego.

## LUBRICATION INFLUENCE ON DURABILITY OF GEAR TRANSMISSION

**Summary.** Selected problems of a lubrication quality influence on the tribological durability of toothed gear sets and bearings are presented in the paper. The particular emphasis was laid on the tribological durability as a function of the friction parameters and cleanness of lubricants.

## ВЛИЯНИЕ СМАЗКИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

**Резюме.** В статье представлено некоторые вопросы влияния смазки на трибологическую долговечность зацеплений зубчатых колёс и подшипников качения. В частности показаны обобщённые зависимости трибологической долговечности от параметра трения и чистоты смазочного масла.

### 1. WSTĘP

Trwałość stanowi jedno z głównych kryteriów oceny przekładni zębatych i wpływa w istotnym stopniu na niezawodność układów napędowych maszyn przemysłowych. W praktycznym ujęciu utrata trwałości wiąże się z wystąpieniem eksploatacyjnego stanu granicznego, wywołującego objętościowe (doraźne lub zmęczeniowe) bądź tribologiczne (powierzchniowe) zniszczenie w stopniu eliminującym przekładnię z procesu dalszego użytkowania.

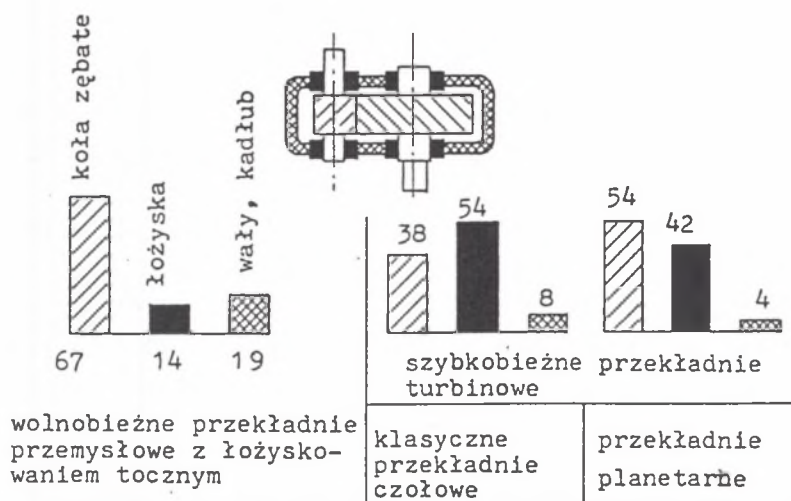
Z uwagi na szeregową strukturę postaci konstrukcyjnej trwałość przekładni zdeterminowana jest poprzez trwałości cząstkowe składowych elementów i węzłów konstrukcyjnych, a mianowicie :

- kół zębatych,
- łożysk,
- uszczelnień,
- wałów,
- kadłubów,
- elementów dodatkowego integralnego wyposażenia przekładni (np. układ smarowania, hamowania, chłodzenia itp.)

Trwałości cząstkowe wymienionych elementów i węzłów konstrukcyjnych przekładni zależą od szeregu czynników eksploatacyjnych (warunków eksploatacji) oraz od rozwiązania konstrukcyjnego (typu przekładni).

Na rys.1 przedstawiono przykładowe wyniki względnych udziałów strumieni uszkodzeń elementów przekładni klasycznych (z nieruchomymi osiami) oraz

przekładni planetarnych (z osiami ruchomymi), uzyskane w badaniach statystycznych dużej populacji przekładni przemysłowych [1].



Rys. 1. Porównanie uszkodzeń węzłów konstrukcyjnych przekładni klasycznych i planetarnych

Fig. 1. The comparison between kinematic pair destructions in classical and planetary gears

Jak widać z rys.1 dla najczęściej stosowanych obecnie przekładni klasycznych największy strumień uszkodzeń przypada na koła zębate (zazębienia), podczas gdy w przypadku przekładni planetarnych dużym stopniem uszkodzeń charakteryzują się również łożyskowania kół planetarnych. Rysunek ten stanowi dobrą ilustrację problemów, tzw. słabych ogniw ujawniających się wraz z rozwojem konstrukcji przekładni.

Z punktu widzenia mechanizmu zużycia fizycznego utrata trwałości przekładni może być wynikiem :

- niszczących procesów objętościowych, głównie znieczerniowych (wały, zęby kół zębatach), a rzadziej statycznych i o charakterze kruchego pęknięcia (wały, kadłuby, koła zębata),
- niszczących procesów tribologicznych (zazębienia, łożyska, uszczelnienia), a rzadziej procesów cierno - korozyjnych (fretting process) dotyczących połączeń czopów wałów z piastami czy posadowienia łożysk.

W wielu szczególnie trudnych warunkach eksploatacji trwałość mogą determinować procesy korozyjne, posiadające złożoną naturę chemiczno - fizyczną.

Jak już wspomniano, trwałość przekładni (w rozumieniu statystycznym dla danego typu obiektu) zależy od szeregu czynników eksploatacyjnych, określanych ogólnie warunkami eksploatacyjnymi.

Wyniki badań niezawodności przekładni przenośników i kombajnów stosowanych w kopalniach węgla wskazują, że około 30÷40% awaryjnych uszkodzeń stanowią zniszczenia tribologiczne, a w tej grupie około 1/3 zniszczeń wynika bezpośrednio ze złej jakości smarowania [2].

Przez jakość smarowania autor rozumie zespolone kryterium oceny smarowania zdefiniowane przez :

- parametry fizykochemiczne i tribologiczne środka smarnego (smaru),
- stopień czystości środka smarnego rozumiany jako zanieczyszczenie ciałami obcymi lub będący wynikiem degradacji eksploatacyjnej smaru,
- stopień zasilania węzła i strefy tarcia środkiem smarnym (obfite bądź skąpe smarowanie, odprowadzenie ciepła).

Pojęcie "jakość smarowania" stanowi istotne kryterium wpływające na trwałość tribologiczną ząbów, łożyskowań i uszczelnień, które może być rozpatrywane zarówno na etapie projektowania, jak i użytkowania przekładni.

Zapewnienie wymaganej jakości smarowania uzyskać możemy :

- na etapie projektowania i konstruowania poprzez optymalny dobór oraz konstrukcyjne zabezpieczenie cyrkulacji środka smarnego,
- na etapie eksploatacji przez przyjęcie odpowiedniego harmonogramu wymiany, uzupełnień, filtracji i ewentualnego chłodzenia środka smarnego.

## 2. WPLYW SMAROWANIA NA TRWAŁOŚĆ TRIBOLOGICZNĄ KÓŁ ZĘBATYCH

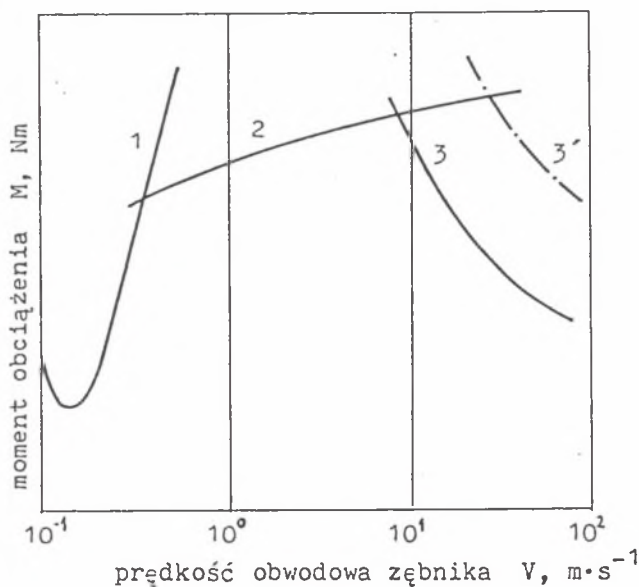
Głównymi procesami niszczącymi kół zębatach są :

- złamania zębów : zmęczeniowe oraz statyczne,
- tribologiczne zniszczenia warstwy wierzchniej zębów, obejmujące :
  - \* zmęczeniowe wykruszanie warstwy wierzchniej (pitting),
  - \* zużycie adhezyjno - termiczne (zatarcie),
  - \* zużycie adhezyjno - ściernie,
  - \* zużycie ściernie.

Ilustrację przebiegu wymienionych procesów niszczących zębów stanowi rys.2, na którym przedstawiono zależność granicznego momentu obciążenia przenoszonego przez parę kół zębatych w zależności od prędkości obwodowej kół zębatych.

Z rys.2 wynika, że obszar "bezpiecznego" użytkowania kół zębatych ulepszanych cieplnie jest określony :

- w zakresie małych prędkości obwodowych (przekładnie wolnoobrotowe) krzywą zużycia adhezyjno - ściernego, co wynika ze współpracy zazębienia w warunkach tarcia granicznego lub mieszanego,
- w zakresie średnich prędkości obwodowych - krzywą zmęczenia powierzchniowego (pittingu),
- w zakresie dużych prędkości obwodowych poprzez zużycie adhezyjno termiczne (zatarcie).



Rys. 2. Zależność granicznego momentu przenoszonego przez przekładnię jako funkcja prędkości obwodowej oraz różnych kryteriów zniszczeń kół zębatych ulepszanych cieplnie

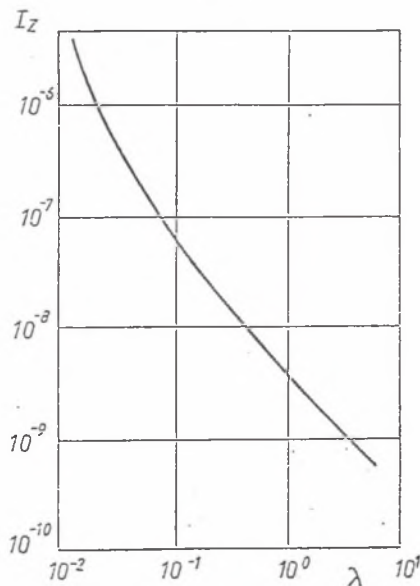
Fig. 2. The dependence of border moment transferred by the gear on the peripheral speed and various criteria of destructions of gears made of steel toughening

Analizując rys.2 należy zwrócić uwagę na to, że położenie krzywych determinujących nośność przekładni, określoną poprzez niszczące procesy tribologiczne (krzywe 2,3,4), może się znacznie zmieniać w zależności od jakości smarowania.

I tak np. można całkowicie wyeliminować wystąpienie zatarcia poprzez wprowadzenie do oleju skutecznych dodatków przeciwwzartciowych (dodatki EP - krzywa 3') albo można znacznie podnieść nośność przekładni z uwagi na pitting, stosując olej o dostatecznie wysokiej lepkości (krzywa 2). Natomiast wzrost stopnia zanieczyszczenia bądź degradacji oleju może spowodować, że w całym zakresie prędkości o nośności przekładni decydować będzie krzywa zużycia adhezyjno - ściernego (krzywa 4).

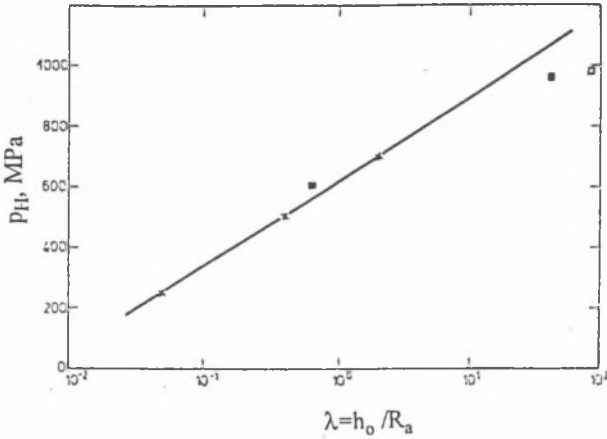
W ogólności trwałość tribologiczna kół zębatych określona jest przez rodzaj tarcia występującego w zazębieniu, zaś rodzaj tarcia określa wartość parametru tarcia  $\lambda$ , będącego ilorzem minimalnej grubości filmu olejowego  $h_0$  (wyznaczonego na podstawie teorii elastohydrodynamicznego smarowania - EHDS) oraz średniej kwadratowej wysokości mikronierówności powierzchni  $R_a$ .

$$\lambda = \frac{h_0}{R_a} \quad (1)$$



Rys. 3. Zależność intensywności zużycia  $I_z$  od parametru tarcia  $\lambda$

Fig. 3. The dependence of  $I_z$  intensity wear on friction parameter  $\lambda$



Rys. 4. Zależność niszczonego maksymalnego naprężenia stykowego Hertza od kryterium tarcia  $\lambda$  (x - wg badań autora, ■ - wg P.H. Dawsona, □ - wg P. Środy)

Fig. 4. The dependence of destructive maximum Hertz contact stress on friction criterion  $\lambda$  (x - acc. to author, ■ - P.H. Dawson, □ - P. Środa)

Na rys.3 przedstawiono opracowaną przez autora na podstawie badań własnych oraz danych literaturowych zależność intensywności zużycia adhezyjno - ściernego  $I_2$  od parametru tarcia  $\lambda$ .

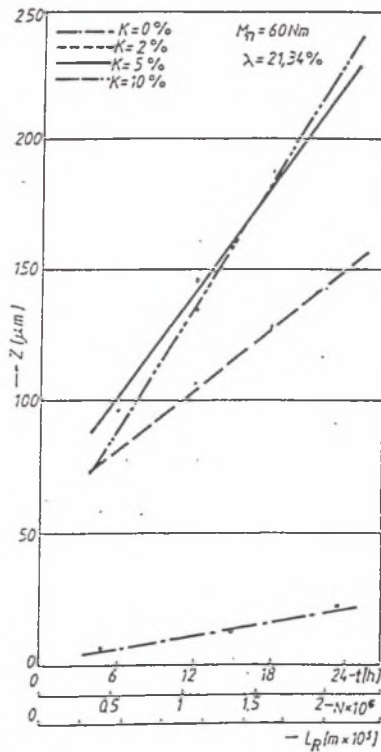
Natomiast na rys.4 przedstawiono eksperymentalną zależność [3] powodującego zniszczenie pittingowe naprężenia stykowego  $p_H$  (obliczonego wzorem Hertza) od parametru tarcia  $\lambda$ . Jak widać, ze wzrostem parametru  $\lambda$  wyraźnie rośnie zmęczeniowa wytrzymałość stykowa warstwy wierzchniej kół zębatych wykonanych ze stali ulepszonej cieplnie.

Jak wynika z tego rysunku, dla  $\lambda > 1$  zużycie  $I_2 < 5 \cdot 10^{-9}$ , co przykładowo dla koła o module  $m = 5$  mm odpowiada zużyciu  $50 \mu\text{m}$  po  $2 \cdot 10^7$  cyklach zazębienia.

Przedstawioną na rys.3 zależność intensywności zużycia adhezyjno - ściernego  $I_2$  od parametru tarcia można wykorzystać do prognozowania trwałości adhezyjno - ścierniej zazębienia, ale tylko w przypadku oleju czystego, bez zanieczyszczeń w postaci cząstek obcych.

Jeśli bowiem w oleju występują cząstki mineralne, np. pyłu węglowego, stwierdzono, że zużycie jest wielokrotnie wyższe.

Na rys.5 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane przez autora w badaniach zużycia kół zębatych smarowanych olejem przekładniowym Transol VG - 220 w stanie bez zanieczyszczeń oraz z zanieczyszczeniami o koncentracji 2; 5 i 10% pyłu



Rys. 5. Zużycie kół zębatach jako funkcja czasu pracy dla różnych koncentracji zanieczyszczeń oleju

Fig. 5. The wear of gears as the function of working time and the concentration of pollution by the coal dust oil

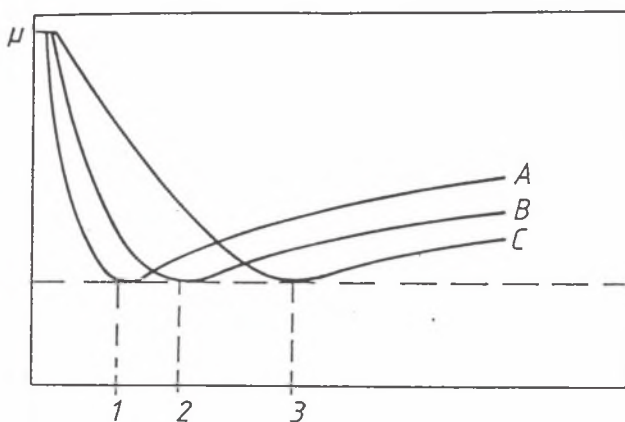
węgla kamiennego, o ziarnistości poniżej 0,5mm i zawartości popiołu równej 21,34 %. Z rysunku tego wynika, że po 24 godzinach pracy (co odpowiadało  $2 \cdot 10^6$  cykli zazębien) zużycie przy smarowaniu olejem zawierającym 2% zanieczyszczeń pyłu węglowego jest 7,5 -krotnie wyższe niż w przypadku smarowania olejem czystym.

Jak wiadomo, istotną własnością oleju, determinującą minimalną grubość elastohydrodynamicznej warstwy oleju w zazębieniu, jest lepkość.

Na rys.6 przedstawiono typowe przebiegi momentu tarcia w łożysku ślizgowym jako funkcji prędkości obwodowej dla trzech różniących się lepkością olejów.

Jak wynika z tego rysunku, olej o większej lepkości po wystąpieniu tarcia płynnego w łożysku powoduje zwiększone opory tarcia, ale przejście z obszaru tarcia mieszanego w obszar tarcia płynnego następuje przy znacznie mniejszej prędkości obwodowej.





Rys. 6. Przebiegi oporów tarcia w łożysku ślizgowym dla oleju o trzech różnych lepkościach  $\eta_A > \eta_B > \eta_C$

Fig. 6. The course of friction resistance in slide bearing for the oil with three various viscosity  $\eta_A > \eta_B > \eta_C$

Jeśli więc rozważamy przypadek częstych zmian prędkości w cyklu eksploatacyjnym maszyny (częste rozruchy i zatrzymania), wówczas zastosowanie oleju o większej lepkości jest szczególnie uzasadnione obniżonym zużyciem, a więc zwiększoną trwałością węzła tarcia. Zatem z punktu widzenia trwałości wskazane jest stosowanie oleju o możliwie wysokiej lepkości. Ze wzrostem lepkości oleju smarującego rośnie nośność kół zębatach z uwagi na pitting, zatarcie oraz zużycie ściernie. Jednak ograniczenie dla wysokiej lepkości oleju wynika z oporów mieszania i przetłaczania, które, jak wiadomo, rosną ze wzrostem współczynnika lepkości.

Mając na uwadze mechanizmy tribologicznych procesów niszczenia warstwy wierzchniej zębów, interesujące jest uwzględnienie innych, poza lepkością, własności fizycznych oleju. Do rozważań teoretycznych nad procesem powstawania i rozwoju pittingu autor wprowadził nową wielkość - napięcie powierzchniowe oleju i uzyskał kryterium bezwymiarowe  $K$

$$K = \frac{\eta \cdot v}{\gamma}, \quad (2)$$

definiujące intensywność wnikania oleju do mikroszczelin rozwijających się z powierzchni zębów.

Uwzględniając to kryterium, względną wytrzymałość stykową wywołującą pitting można wyrazić w postaci:

$$\frac{P_H}{E} = f(\lambda, K), \quad (3)$$

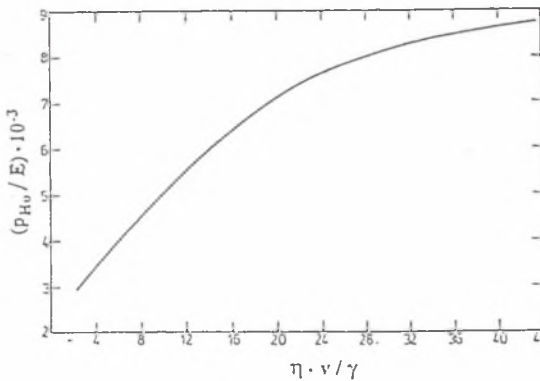
gdzie:

- $P_H$  -naprężenie stykowe,
- $E$  -zastępczy moduł Younga,
- $\lambda$  -parametr (kryterium) rodzaju tarcia,

przy czym:

- $\eta$  -współczynnik lepkości dynamicznej oleju,
- $v$  -prędkość obwodowa kół zębatych,
- $\gamma$  -napięcie powierzchniowe oleju.

Uzyskany w eksperymentalnych badaniach próbek walcowych na tribometrze Amsler [4] przebieg funkcji  $\frac{P_H}{E} = \varphi\left(\frac{\eta \cdot v}{\gamma}\right)$  przedstawiono na rys.7.



Rys. 7. Zależność względnej wytrzymałości stykowej od kryterium wnikania oleju smarującego do mikroszczelin zmęczeniowych warstwy wierzchniej

Fig. 7. The dependence of relative contact strength on the criterion of an oil penetration into superficial layer fatigue microcracks

### 3. WPŁYW SMAROWANIA NA TRWAŁOŚĆ ŁOŻYSK TOCZNYCH

Istotność wpływu smarowania na trwałość łożysk tocznych znajduje odzwierciedlenie w metodyce określania trwałości łożysk tocznych, określanej w specjalistycznych katalogach, np.[5]. Aktualnie tzw. trwałość efektywna łożyska  $L$  określana jest jako:

$$L = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot L_{10} = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{F}\right)^q, \quad (4)$$

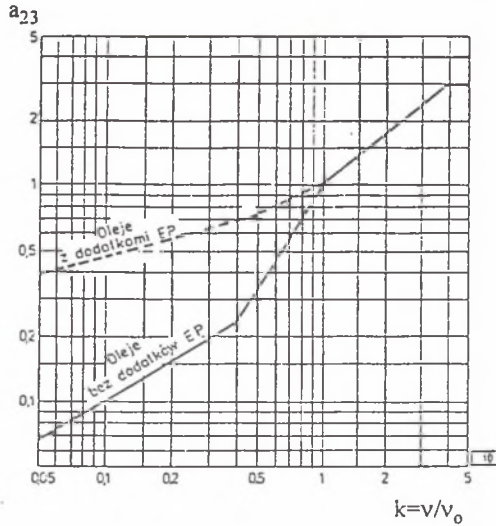
gdzie:

- $L_{10}$  - trwałość nominalna (obliczeniowa) łożyska przy prawdopodobieństwie jej zachowania  $p=0,90$ ,
- $a_1$  - współczynnik wymaganej niezawodności  
dla  $p = 0,90$        $a_1 = 1,0$ ,  
dla  $p = 0,99$        $a_1 = 0,21$ ,
- $a_2$  - współczynnik materiału elementów łożyska; dla konwencjonalnej stali łożyskowej  
 $a_2 = 1,0$ , a dla stali z wytopu próżniowego  $a_2 < 1,0$ ,
- $a_3$  - współczynnik warunków pracy, a zwłaszcza jakości smarowania,  
 $a_{23} = a_2 \cdot a_3$  - łączny współczynnik materiału i jakości smarowania łożyska.

Katalogi firm produkujących łożyska podają szczegółowe zasady doboru poszczególnych współczynników występujących w zależności (4). Na rys.8 przedstawiono przykładowy nomogram wg [5], pozwalający określić wartość współczynnika jakości smarowania  $a_{23}$  w zależności od ilorazu lepkości oleju zastosowanego do smarowania łożyska  $\eta$  do lepkości wymaganej  $\eta_0$ , określonej za pomocą teorii EHDS.

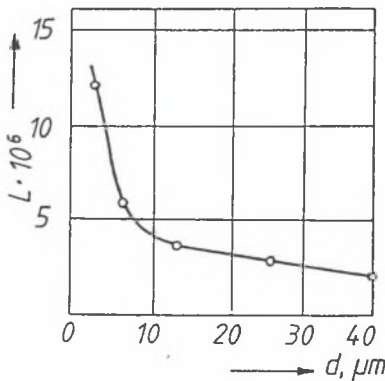
Z rysunku tego wynika, że z uwagi na trwałość uzasadnione jest stosowanie do smarowania łożysk oleju o zwiększonej lepkości (wzrost ilorazu  $k=\eta/\eta_0$ ) oraz uszlachetnianie oleju dodatkami wysokociśnieniowymi typu EP w przypadku, gdy przewidywana jest praca łożyska w warunkach tarcia mieszanego ( $k \leq 1$ ). Problem wpływu czystości środka smarnego na trwałość łożyska ilustruje rys.9 [6]. Z rysunku tego wynika, że szczególnie duży wpływ na trwałość mają ziarna (w tym przypadku krzemionki  $\text{SiO}_2$ ) pyłu o średnicy mniejszej od  $10\mu\text{m}$ , stanowiące zanieczyszczenie

oleju. Dlatego chcąc zapewnić wysoką trwałość łożyska należy przeprowadzać dokładną filtrację oleju, stosując filtry o średnicy oczka co najmniej  $10\ \mu\text{m}$ .



Rys. 8. Zależność współczynnika warunków smarowania łożyska  $a_{23}$  od parametru lepkości  $k$  oraz stopnia uszlachetnienia oleju

Fig. 8. The course of  $a_{23}$  the coefficient of the lubrication conditions in bearing for the viscosity parameter  $k$  and the degree of oil purification by the addition of EP



Rys. 9. Trwałość łożyska tocznego jako funkcja średnicy ziarn zanieczyszczeń oleju pyłem krzemionkowym

Fig. 9. The durability of rolling bearing as the function of the diameter of grains which pollute oil with  $\text{SiO}_2$  dust

#### 4. PODSUMOWANIE

W opracowaniu przedstawiono podstawowe problemy związane z wpływem jakości smarowania na trwałość przekładni zębatych. Istotnymi elementami tego opracowania są:

- przedstawienie uogólnionego ujęcia wpływu jakości smarowania na trwałość tribologiczną zazębień. Trwałość ta może być wyrażona jako funkcja parametru tarcia  $\lambda$ , określającego względną grubość elastohydrodynamicznego filmu smarnego,
- zwrócenie uwagi na to, że poza lepkością, która jest podstawową wielkością charakteryzującą środek smarny, napięcie powierzchniowe oleju jest parametrem mogącym mieć istotny wpływ na przebieg procesu zmęczenia stykowego warstwy wierzchniej; wpływ napięcia powierzchniowego może być ujęty za pomocą kryterium wnikania oleju do mikroszczelin  $K$ ,
- przedstawienie wpływu zanieczyszczeń w postaci cząstek mineralnych zawieszonych w oleju na zwiększenie zużycia ściernego, a zatem znaczne obniżenie trwałości.

W opracowaniu przedstawiono tylko wybrane zagadnienia wpływu jakości smarowania na trwałość tribologiczną kół zębatych i łożysk, podczas gdy trwałość przekładni zależy od szeregu dalszych elementów, takich jak: trwałości i hermetyczności uszczelnień oraz degradacji własności użytkowych środka smarnego. Zagadnienia te stanowią główne kierunki aktualnie prowadzonych prac w wielu ośrodkach naukowych i produkcyjno-rozwojowych.

#### LITERATURA

- [1] Erlenspiel K.: Betriebserfahrungen mit Stirrad und Planetengetrieben. Der Maschinenschaden (45), 1972 nr 4
- [2] Skoć A., Spałek J.: Analiza awaryjności przekładni zębatych pracujących w zespołach napędowych maszyn stosowanych w górnictwie ze szczególnym uwzględnieniem kół stożkowych. Maszyny Górnicze, KOMAG, Gliwice, czerwiec 1994

- [3] Spalek J.: Analiza wpływu oleju smarującego na powstawanie i rozwój pittingu. Zagadnienia Eksploatacji maszyn. (57-58), 1984 z.1-2
- [4] Spalek J.: O wpływie napięcia powierzchniowego oleju w procesie zmęczeniowego wykruszania warstwy wierzchniej. Mat. XIX Szkoły Tribologicznej, Częstochowa, czerwiec 1994
- [5] Łożyska toczne - katalog. Wyd. WEMA, Warszawa 1994
- [6] Essers H.: Verschleiss-schmutzfiltration für Schmieranlagen. Antriebstechnik (28) nr 2, 1989

Recenzent: Prof. dr hab. inż. **Karol REICH**

Wpłynęło do Redakcji w sierpniu 1994 r.

### Abstract

The essential problems of the lubrication influence on a durability of gear transmission were presented.

The main accomplishments of the paper are:

- generalized formulation of the lubrication influence on tribological durability of gearing. Durability can be expressed as the function of the dimensionless parameter  $\lambda$ , ratio between the minimum film thickness and the roughness. This relation was proved for abrasive - adhesive mode of wear (fig.3) and pitting (fig.4),
- indication that apart from viscosity, which is a fundamental physical property of oils, the surface tension may determine the fatigue limit of surface layer (fig.7). The surface tension is an important property of oils,
- indication of importance of oil contamination by mineral solid particles on durability of gearing (fig.5) and bearings (fig.9).