

Stanisław F. ŚCIESZKA

## DIAGNOSTYKA OLEJOWA MASZYN GÓRNICZYCH

**Streszczenie.** Na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii oceniono różne metody diagnostyczne, nadające się do monitoringu przekładni zębatych dużych mocy. W wyniku pomiarów ustalono, że tylko metody wibracyjne i analizy produktów zużycia dają zadowalającą korelację z rejestrowanymi uszkodzeniami. Wskazano na ograniczenia metod opartych na pomiarze temperatury oraz niskozakresowych analizatorów drgań. Przedstawiono zmodyfikowany analizator produktów zużycia (APZ).

## MINING MACHINE OILS CONDITION MONITORING

**Summary.** The results of a laboratory evaluation of a number of machine condition monitoring techniques on a large National Coal Board gearbox are given. Of the parameters measured and recorded, only vibration and oil debris values provided any positive correlation with failure of the gearbox during the test. The limitation of using temperature is noted, and so is the use of hand-held narrow-band vibration measurement instruments. The successful results of applying a modified oil analysis technique to underground equipment are also included.

## МАСЛЯНАЯ ДИАГНОСТИКА ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Резюме.** На базе проведенных в Великобритании исследований выполнена оценка различных диагностических методов пригодных в мониторинге высокомошных зубчатых передач. В результате измерений констатировано, что только вибрационные методы и анализ продуктов износа дают удовлетворительное соотношение с регистрируемыми повреждениями. Указано на ограничения методов базирующих на измерениях температуры и низкочастотных анализаторов колебаний. Представлен модифицированный анализатор продуктов износа (АПИ).

### 1. WPROWADZENIE

Stosowanie rutynowego diagnozowania stanu urządzeń, RDSU, jest tradycyjnie kojarzone z przemysłem lotniczym lub zbrojeniowym a nie z górnictwem. Tymczasem właśnie zastosowanie RDSU okazało się jedną z najbardziej owocnych innowacji mechanicznych, dzięki której osiągnięto poprawę szeregu wskaźników produkcyjnych w górnictwie. Znaczenie RDSU rośnie proporcjonalnie do koncentracji i mechanizacji robót górniczych. Koncentracja wydobycia minerałów i wzrost wydajności maszyn górniczych oznacza większe straty w przypadku uszkodzenia jednego z szeregowo połączonych elementów systemu. Jedną z technik RDSU, która okazała się szczególnie niezawodna, jest diagnostyka olejowa oparta na analizie produktów zużycia, akumulujących się w oleju oraz na analizie spektrometrycznej oleju. Diagnostyka ta jest obecnie na tyle uproszczona, że może być wykonywana i interpretowana na poziomie np. personelu technicznego kopalni. Śledzenie procesu zużycia przez personel kopalni oraz osiągana umiejętność samodzielnego interpretowania procesu degradacji elementów maszyn wywołuje pośrednio zwiększenie zrozumienia prawidłowej eksploatacji maszyn wśród tego personelu.

Umożliwione dzięki diagnostyce olejowej przewidywanie uszkodzeń pozwoliło w kopalniach British Coal na wykonanie napraw zespołów w systemach mechanicznych w czasie bezprodukcyjnym, eliminując w ten sposób część przerw w produkcji i strat ekonomicznych. Doświadczenia brytyjskie wykazują, że połowa awarii, które dalej występowały, była spowodowana uszkodzeniami, których monitorowanie nie zostało wypracowane lub nie jest objęte przez RDSU.

Celem artykułu jest przedstawienie potencjalnych możliwości diagnostyki olejowej oraz pokazanie na przykładzie doświadczeń z British Coal, jakie oszczędności można uzyskać przy prawidłowym stosowaniu RDSU w systemach technologicznych kopalni [3,4].

## 2. PORÓWNANIE METOD DIAGNOZOWANIA NA PRZYKŁADZIE PRZEKŁADNI ZĘBATEJ MASZYN GÓRNICZYCH

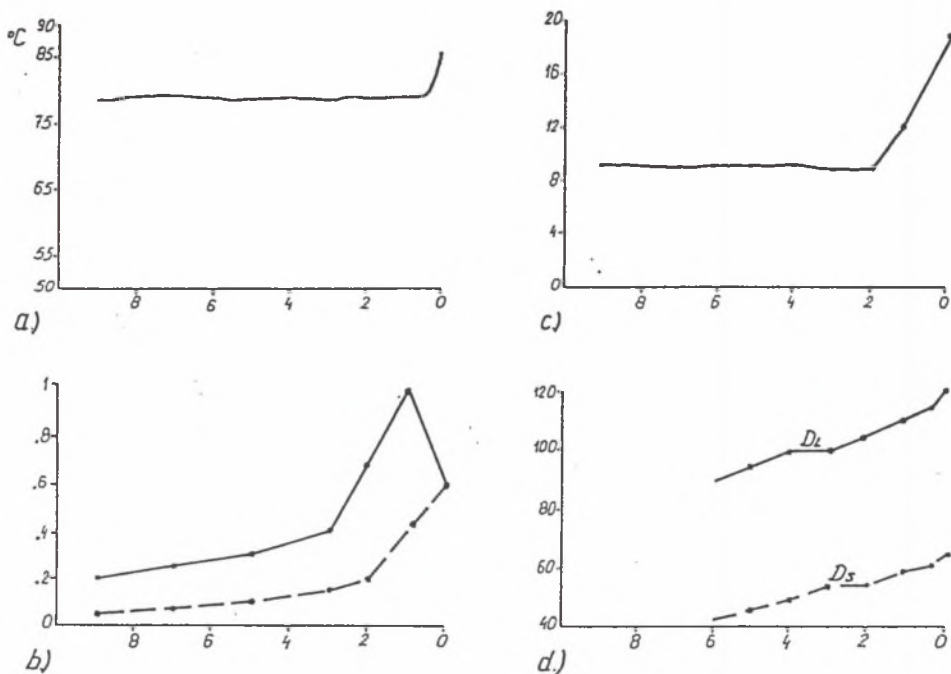
Do badań wstępnych na stanowisku mocy krążącej wybrano przekładnię zębatą małej mocy (45 kW), typową w kopalniach National Coal Board (NBC) [3]. Celem badań było:

- gromadzenie danych o zmianach temperatury, o drganiach przekładni oraz o zmianach własności oleju, towarzyszących uszkodzeniom różnych elementów przekładni,
- dokonanie oceny czujników i przyrządów pomiarowych w kontekście ich stosowania w kopalniach węgla kamiennego,
- dokonanie oceny różnych metod diagnostycznych w ich funkcji przewidywania uszkodzeń.

W czasie badań mierzono i rejestrowano w regularnym cyklu:

- temperaturę korpusu w kilku punktach oraz temperaturę oleju,
- drgania korpusu czterema czujnikami (0÷10 kHz) przytwierdzonymi do jego powierzchni,
- stan oleju przez próbnikowe oceny zawartości produktów zużycia za pomocą ferrografu [1,2] i analizatora produktów zużycia (APZ), (Załącznik 1).

Po ponad 2000 godzin badań wstępnych przekładni nastąpiło zniszczenie zmęczeniowe jednego wałka. Wykresy temperatury, drgań i poziomu zanieczyszczeń produktami zużycia z ujednoczoną współrzędną czasu wyrażoną w dniach poprzedzających zniszczenie wałka przedstawia rys.1. Na podstawie tych wykresów można postulować, że diagnostyka oparta na analizie drgań oraz analizie olejowej ma największą szansę prawidłowego przewidywania uszkodzeń przekładni zębatych. Wzrost temperatury (rys. 1a) może zostać niezauważony lub niewłaściwie zinterpre-



Rys. 1. Wyniki badań porównawczych uzyskanych w trakcie monitorowania przekładni zębatej, w której po ponad 2000 godz. badań przyspieszonych nastąpiło pęknięcie wału na trzecim stopniu przełożenia, przedstawione w funkcji ilości dni do awarii:

a - wykres temperatury oleju

b - poziomy drgań i ich druga harmoniczna

c - odczyty analizatora produktów zużycia (APZ)

d - odczyty licznika cyfrowego ferrografu

Fig. 1. Comparative results from over 2000 hours monitoring of the gearbox. All the measured parameters are drawn to the same time-scale, i.e. number of days before the failure of the 3rd reduction shaft:

a - temperature of the lubrication oil

b - vibration levels of shaft rotation and its second harmonic

c - debris tester reading

d - ferrography readings

towany w sytuacji ciągłej zmiany obciążenia. Najprostszą metodą diagnozowania przekładni zębatej okazał się pomiar i analiza metalicznych produktów zużycia w oleju. Nawet, jeżeli olej był wstępnie mocno zanieczyszczony, metoda ta rejestrowała jednoznaczny i z dostatecznym wyprzedzeniem wzrost poziomu produktów zużycia

przed awarią (rys.1c) o poważnym tribologicznym charakterze. Najszerzą gamę uszkodzeń jest zdolna zarejestrować metoda oparta na analizie widma drgań.

Monitorowanie powinno obejmować drgania w zakresie od 0 do 10 kHz, gdyż sygnały w przekładni zębatej mogą pochodzić z wielu źródeł, jak np.: nieosiowości i zginania wałów (niska częstotliwość), zazębienia (średnia częstotliwość) i zmęczenie powierzchniowe w łożyskach tocznych (wysoka częstotliwość).

### 3. ZASTOSOWANIE DIAGNOSTYKI OLEJOWEJ W PRZEKŁADNIACH ZĘBATYCH MASZYN GÓRNICZYCH

Na podstawie wyników badań wstępnych rozpoczęto w czterech kopalniach należących do British Coal rutynowe diagnozowanie 53 przekładni mechanicznych. Do diagnozowania zastosowano metodę ferrograficzną (Załącznik 1). Pomiary wykonywano w odstępach jednego tygodnia, gdyż metoda umożliwiała od 50- do 100-godzinne wyprzedzenie informacyjne rozpoczynającego się procesu intensywnego zużycia, kończącego się awarią. Najwygodniejsze okazało się pobieranie próbki oleju w środę, tak aby w piątek przed rozpoczęciem zmiany obsługa techniczna miała informację o przekładni i mogła zaplanować jej ewentualną wymianę w czasie niedzielnej przerwy produkcyjnej. Skróconą ocenę badań przedstawiają tablice 1 i 2. Tablica 1 przedstawia przyczyny wyłączenia przekładni z eksploatacji lub jej czasowego zatrzymania. Tablica 2 przedstawia przyczyny awarii w tych przekładniach, które zostały wyłączone z eksploatacji na podstawie testów ferrograficznych.

Badania ferrograficzne prowadzone w ramach RDSU dają informację o stanie przekładni pracującej w środowisku górniczym, umożliwiając jej prewencyjne wyłączenie z eksploatacji. Ze względu jednak na stopień skomplikowania procedury badań jest mało realne, że będą one właściwie wykonywane przez personel techniczny, np. oddziału maszyn dołowych. Tworzenie natomiast centralnego laboratorium obsługującego diagnostykę olejową uznano w Wielkiej Brytanii za rozwiązanie zbyt kosztowne.

Jako rozwiązanie kompromisowe zaproponowano prostszą procedurę, czyli tzw. analizator produktów zużycia (APZ), opisany w Załączniku 1.

Tablica 1

## Wyniki cyklu badań diagnostycznych

Lp.	Przyczyna wyłączenia przekładni	Liczba przekładni	Uwagi
1	Wynik analizy ferrograficznej	18	16 prawidłowych diagnoz
2	Awaria urządzenia sprzężonego mechanicznie	10	
3	Awaria w czasie pracy nie wykryta w procesie diagnozowania	4	2 awarie nastąpiły w pierwszym tygodniu po rozpoczęciu badań
4	Zakończenie produkcji na ścianie węglowej	12	

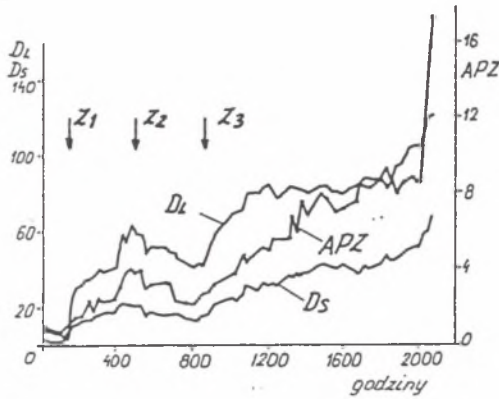
Tablica 2

## Dominujące przyczyny uszkodzeń wykryte za pomocą ferrografii

Przyczyna uszkodzenia	Liczba
Zużycie ściernie	3
Zły montaż	7
Zużycie pittingowe na zębach	1
Zużycie zmęczeniowe w łożyskach	3
Uszkodzenie układu smarowania	2

Dla oceny tej procedury wykonano osobno badania przyśpieszone, porównujące na przykładzie przekładni zębatej, informacje z ferrografu i z APZ. Zapis wyników eksperymentu przedstawia rys.2, na którym zaznaczono miejsca (chwile) wprowadzenia zanieczyszczeń w postaci pyłu węglowego i kwarcowego. Na wykresie widać moment rozpoczęcia procesu intensywnego niszczenia przekładni, wywołanego zużyciem zmęczeniowym w łożyskach i pękaniem wału.

W chwili obecnej na kilku kopalniach British Coal działa system komputerowego (PC) gromadzenia danych, umożliwiający inżynierowi odpowiedzialnemu za eksploatację maszyn, kontrolę wyników badań APZ i analizę trendów zmian gęstości ferromagnetycznych produktów zużycia w przekładniach.



Rys. 2. Wykres odczytów z ferrografu ( $D_L$ ,  $D_S$ ) oraz analizatora produktów zużycia (APZ) z zaznaczonymi miejscami wprowadzania zanieczyszczeń do oleju ( $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ )

Fig. 2. Plot of ferrography readings ( $D_L$  and  $D_S$ ) and Debris Tester reading against time with contamination of oil ( $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$ ) indication

#### 4. WNIOSKI

Badania wykazały, że analiza produktów zużycia w olejach przekładni zębatych maszyn górnictwa jest bardzo skuteczną metodą rutynowego diagnozowania stanu urządzenia (RDSU).

Mniej skomplikowany w obsłudze od ferrografu analizator produktów zużycia (APZ) okazał się przyrządem nadającym się do stosowania w oddziałach maszynowych kopalni, bez konieczności organizowania osobnych laboratoriów do jego obsługi.

## ZAŁĄCZNIK 1

### Analiza produktów zużycia

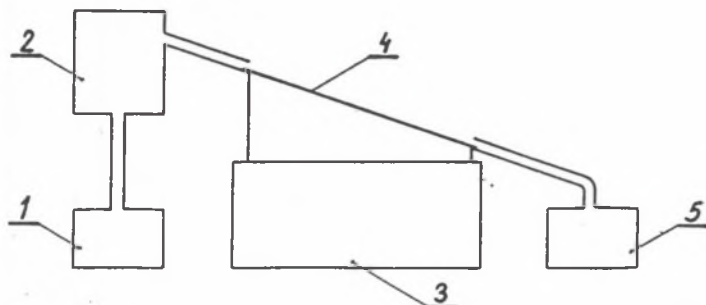
Na analizę produktów zużycia w oleju składa się nie jedna, a wiele technik, których celem jest opis stanu maszyny na podstawie ilości, kształtu, wielkości i struktury fizykochemicznej produktów zużycia zawieszonych w oleju smarującym. Najczęściej stosowaną techniką jest tzw. ferrografia rozwinięta przez firmę Foxboro Trans-Sonic Inc. W oparciu o pryncypia ferrografii powstało szereg mniej lub bardziej uproszczonych technik. Jedną z nich to tzw. analizator produktów zużycia (APZ) firmy Inspection Instruments Limited, który jest stosowany w kopalniach NCB w Wielkiej Brytanii.

#### 1. Ferrograf

Instrument ten składa się z dwóch części: z licznika cyfrowego i z analizatora. Licznik cyfrowy umożliwia wytrącanie w szklanej rurce produktów zużycia. Wytrącanie odbywa się warstwami zależnie od wielkości ziarn. Dwa źródła światła w położeniach odpowiadających wielkości ziarn w przedziale  $1\div 2\ \mu\text{m}$  oraz powyżej  $5\ \mu\text{m}$  w połączeniu z fotoelektronicznym miernikiem tłumienia światła dokonują oceny gęstości małych  $D_S$  i dużych  $D_L$  produktów zużycia. Wartości liczbowe tych gęstości naniesione na wykres (rys.2) umożliwiają wyznaczenie trendu zmian i dokonanie diagnozy stanu badanego urządzenia.

Analizator ferrografu natomiast umożliwia wytrącenie i osadzenie na szklanej płytce mikroskopowej (rys.3) produktów zużycia w celu ich dalszego badania, np. na mikroskopie optycznym lub elektronowym.





Rys. 3. Schemat analizatora ferrografu:

- 1 - próbka oleju,
- 2 - pompa o wydajności  
0,25 ml/min,
- 3 - magnes,
- 4 - szklana płytka mikroskopowa,
- 5 - zbiornik

Fig. 3. Diagram of ferrograph:

- 1 - oil sample,
- 2 - pump of 0,25 ml/min delivery,
- 3 - magnet,
- 4 - glass slide,
- 5 - container

## 2. Analizator produktów zużycia (APZ)

Do badań za pomocą APZ próbkę oleju pobiera się w ten sam sposób jak do badań ferrograficznych, następnie podgrzewa się do temperatury 65°C, miesza dla uzyskania jednorodnej zawiesiny produktów zużycia w oleju. Odmierza się strzykawką 2 ml, rozcieńcza, a następnie filtruje przez 5 µm filtr. Filtr wraz z osadzonymi produktami zużycia suszy się i umieszcza na głowicy APZ dla uzyskania odczytu, który zależy od ilości (masy) materiału ferromagnetycznego na filtrze. Wartości liczbowe odczytów są nanoszone na wykres (rys.2) tak samo jak wyniki z licznika cyfrowego ferrografu.

## LITERATURA

- [1] Bowen R., Scott D., Seifert W., Westcott C.: Ferrography, Tribology International, 1976 No 6, s.109-115
- [2] Scott D.: Debris examination - a prognostic approach to failure prevention. Wear, (1975) 34 s.15-22
- [3] Levis D.: Machine condition monitoring evaluation. Konferencja Międzynarodowa pt. "War on Wear", Nottingham 1984
- [4] Baker A., Morton G., Yardley E.: The effectiveness of wear debris monitoring in relation to the performance of gear transmissions used underground. Konferencja Międzynarodowa pt. "War on Wear", Nottingham 1984

Recenzent: Prof. dr hab. inż. **Jan BROŚ**

Wpłynęło do Redakcji w kwietniu 1994 r.

### Abstract

Having made a general comparison between the available machine condition monitoring techniques on a typical mining gearbox, a better understanding of each technique's limitations was described. The response time and sensitivity of each measured parameter change to the three failures showed that only two had any potential: vibration and oil debris analysis were seen to respond, whereas temperature produced only a small effect with the one catastrophic failure and that was only seen in the last stage of the failure.

The simplest method for monitoring gearbox condition was the metallic debris level measurement, even with the high contamination levels present in the gearbox oil, it gave a clear, increasing trend prior to the major break down of the box.

The only method to provide indication of all three faults was the spectral vibration analysis.

Vibration monitoring over the range 0 to 10 kHz is desirable since, in practice, faults could be signalled throughout the frequency spectrum, shaft bending fatigue and shaft alignment (low frequency), teeth meshing (medium frequency) and bearing fatigue (high frequency) were three typical faults identified in the test.

Temperature monitoring, widely considered as a cheap method of condition monitoring was very limited in its application.

Extensive field trials have shown that wear debris analysis can be an effective means of monitoring the condition of the typical of gear transmission used underground.

Based on the results of trials to assess the effectiveness of ferrography a new simple method of carrying out wear debris analysis has been devised. The method has been shown to be suitable for colliery level exploitation and has been shown to be effective in predicting machine failures.