

**Ryszard Marczak, Miłosz Marczak, Zbigniew Ranachowski
Jan Guzik, Małgorzata Wojtyniak**

**WSPÓŁCZYNNIK TŁUMIENIA AMPLITUDY
SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ JAKO MIARA
AKTYWNOŚCI POWIERZCHNIOWEJ DODATKÓW
SMARNOŚCIOWYCH**

**AMPLITUDE ATTENUATION COEFFICIENT OF ACOUSTIC
EMISSION SIGNAL AS A MEASURE OF SURFACE
ACTIVITY OF LUBRICITY ADDITIVES**

Słowa kluczowe:

smarność, olej napędowy, proces tribologiczny, emisja akustyczna, deskryptor, współczynnik tłumienia amplitudy

Key words:

lubricity, diesel oil, tribological process, acoustic emission, descriptor, amplitude attenuation coefficient

Streszczenie

W referacie przedstawiono wyniki badań właściwości smarnych uzyskane z wykorzystaniem dwu wersji aparatu czterokulowego. Do oceny właściwości smarnych zastosowano model fizycznego przzerwania ciągłości warstwy granicznej w styku skoncentrowanym oraz analizę

sygnału emisji akustycznej w węźle tarcia. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że przebiegowi każdego procesu tribologicznego towarzyszy właściwy mu sygnał emisji akustycznej. Zaproponowano współczynnik tłumienia amplitudy jako deskryptor stanu systemu tribologicznego

WSTĘP

Wymagania ekologiczne dotyczące ochrony środowiska naturalnego zmuszają zarówno producentów samochodów, jak i rafinerie ropy naftowej do ciągłego poszukiwania nowych rozwiązań „ograniczania emisji do atmosfery szkodliwych składników spalin”.

Olej napędowy jest drugim, co do powszechności stosowania, paliwem (obok benzyny), służącym do zasilania silników z zapłonem samoczynnym. Spalanie oleju napędowego powoduje, że zawarte w nim związki siarki prawie całkowicie przechodzą do atmosfery w postaci tlenków. Obowiązująca w krajach europejskich norma EN 590 ogranicza zawartość siarki w oleju napędowym do 350 ppm, a od 2005 roku – do 10 ppm; ograniczeniu podlega także zawartość związków aromatycznych (do 5% objętości w paliwie). Stosowane w rafineriach procesy hydrokrakingu, hydrodesiarczania i hydrodearomatyzacji oleju napędowego zadowolili ekologów; zasilanie niskosiarkowym paliwem silników wysokoprężnych spowodowało natomiast, zaobserwowane w ostatnim dziesięcioleciu ubiegłego wieku, zmniejszenie trwałości niektórych typów pomp paliwowych. Powstał problem tzw. „smarności”¹ oleju napędowego i wynikająca stąd konieczność opracowania i znormalizowania metod jej oznaczania.

M. Wojtyniak omówiła w swojej rozprawie [2] zarówno problem istoty smarności oraz metody jej badania w świecie, jak i koncepcję własnej metody opartej na fizykochemicznym modelu procesu przerwania ciągłości warstwy granicznej w styku skoncentrowanym aparatu czterokulowego; wprowadziła także pojęcie współczynnika tłumienia amplitudy sygnału akustycznego emitowanego w procesie tribologicznym, za pomocą którego można oceniać efektywność procesów sorpcyjnych zachodzących na powierzchni tarcia.

¹ „smarność”; niefortunny – zdaniem Autorów – termin, którym zastąpiono używane przed II wojną światową w Polsce i zaraz po niej słowo „smarowność”. Rozumiano przez nie – „zdolność smaru (lub zespołu jego własności, różnych od lepkości) do zapewnienia odpowiedniego smarowania w przypadku, gdy warstewka smarowa jest tak cienka, że jej działanie nie zależy wyłącznie od lepkości” [1].

Powyższym zagadnieniem będziemy się zajmować w dalszej części niniejszej pracy.

PROBLEMY BADANIA „SMARNOŚCI” OLEJU NAPĘDOWEGO

Olej napędowy jest nośnikiem energii niezbędnej do napędzania silnika o zapłonie samoczynnym. zanim jednak zostanie spalony w cylindrach silnika przebywa długą drogę (zbiornik, pompa wtryskowa, wtryskiwacz) smarując „przy okazji” ruchome elementy tej pompy. Jako kryterium oceny właściwości smarnych oleju napędowego w badaniach stanowiskowych przyjmuje się w metodzie firmy Bosch [3] wielkość zużycia elementów pompy po 1000 godzinnym teście i zmianę ciśnienia przetłaczania; ocenia się także zmianę wielkości wtryskiwanej dawki paliwa po 100 i 500 godzinach. Przyjmuje się, że w/w metoda odwzorowuje eksploatacyjne zużycie równoważne przebiegowi 100 000 km samochodu. Stanowiskowe i eksploatacyjne metody badania smarności olejów napędowych są długotrwałe. Nie można zatem posługiwać się nimi do oceny jakości oleju napędowego wytwarzanego w rafineriach w milionach ton rocznie. Stosowane dotychczas laboratoryjne metody badań olejów napędowych nie odtwarzają wiernie wymuszeń występujących w rzeczywistych warunkach eksploatacji; nie zawsze też oceny ich właściwości smarnych weryfikują się w praktyce. Stan taki uzasadnia potrzebę poszukiwania metody lepiej odzwierciedlającej eksploatacyjną rzeczywistość i dokonywanie ocen smarności w krótkim czasie.

Badania mechanizmu oddziaływania dodatków smarnościowych w strefie tarcia przedstawił autor pracy [4]; udowodnił on, że efektywność estrów kwasów karboksylowych i alkoholi różni się od oddziaływania substratów tych estrów. Stosowane przemysłowo dodatki smarnościowe działają efektywnie niekiedy przy zawartości kilkunastu ppm. Jak wykazał M. Wojtyniak [2], badania według obowiązującej w Polsce metody HFRR nie wykrywają zmian smarności oleju napędowego powodowanych tak niewielkimi dawkami niektórych typów tych dodatków. Zdecydowanie lepszą zdolnością rozdzielczą charakteryzuje się metoda wykorzystująca model przerwania ciągłości warstwy granicznej w styku skoncentrowanym kulek aparatu czterokulowego.

Punktowy styk skoncentrowany modeluje w pewnym sensie styk dwu występów mikronierówności trących się powierzchni dwóch ciał.

W modelu tym na mikrowystęp poruszający się z pewną prędkością względem drugiego mikrowystępu działa siła obciążająca oraz siła wyporu hydrodynamicznego. W momencie przerwania warstwy granicznej, w przypadku smarowania olejem nie zawierającym dodatków, obciążenie nadane wynosi P_{t1} , a dla oleju zawierającego dodatek – przerwanie warstwy granicznej następuje przy obciążeniu P_{t2} , wyższym niż P_{t1} . Ponieważ siła wyporu hydrodynamicznego ma w obydwu przypadkach taką samą wartość, gdyż kulka porusza się z tą samą prędkością, to wzrost wartości obciążenia zacierającego w drugim przypadku jest spowodowany obecnością tworzących się na powierzchni warstw granicznych. Zatem, różnica wartości obciążenia zacierającego P_{t2} i P_{t1} charakteryzuje efekt (z punktu widzenia właściwości smarnych) jaki powstaje po wprowadzeniu do oleju dodatku. Badania eksperymentalne wielkości zużycia kulek przeprowadzono za pomocą aparatu czterokulowego T-02 w Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu. Aparat uruchamiano zadając wcześniej obciążenie równe obciążeniu zacierającemu P_t (średnia wartość P_t z trzech prób). Pozwoliło to na uzyskanie w czasie 30 sekund biegu maszyny trzech różnych stanów pary trącej:

- intensywnego zużywania mechanicznego,
- docierania mechanicznego,
- docierania chemicznego (w tym przypadku utleniającego).

Po zakończeniu 30 sekundowego biegu badawczego mierzono średnicę śladu zużycia (skazy) kulek.

Można z dużym prawdopodobieństwem przyjąć, że podobne stany występują w każdej smarowanej parze trącej; może nią być modelowa para maszyny tarciowej; mogą nimi być pary trące mechanizmów pompy wtryskowej lub innych urządzeń. Wydaje się, że akustyczne deskryptory stanu systemu tribologicznego maszyny tarciowej, który można określić w miarę precyzyjnie, mogą posłużyć do identyfikacji przebiegu procesu tribologicznego w rzeczywistych parach trących.

WYKORZYSTANIE SYGNAŁU EMISJI AKUSTYCZNEJ (SEA) DO BADAŃ PROCESÓW TRIBOLOGICZNYCH

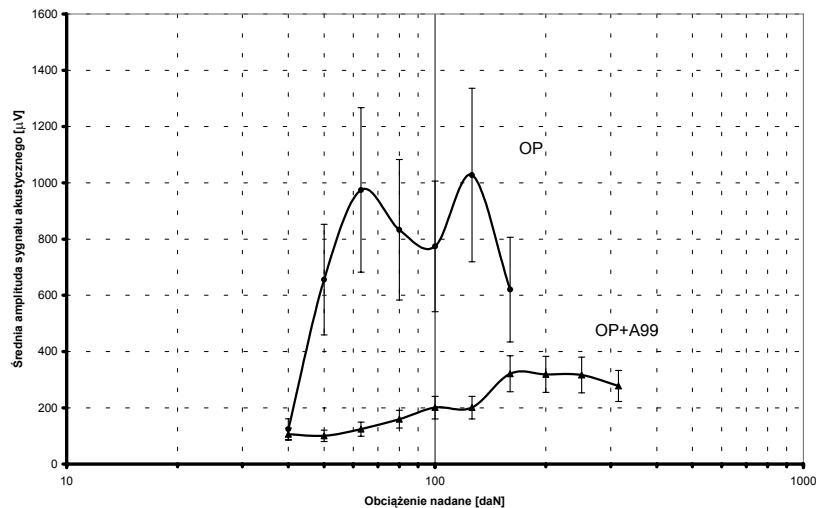
Emisja akustyczna (AE - acoustic emission) może być wykorzystana do badania ośrodków materialnych poprzez analizę sygnałów akustycznych powstających wewnątrz lub na powierzchni ośrodka (także urządzenia, np. maszyny złożonej ze współpracujących elementów) przy zmianach naprężeń

wewnętrznych. Termin ten nie jest zupełnie ścisły, dotyczy bowiem sygnałów o szerokim paśmie częstotliwości, od infradźwięków do ultradźwięków, w zakresie od 50 Hz do 20 MHz. Najczęściej rozpatrywanie tego zjawiska ogranicza się do ciał stałych. Stosuje się wówczas węższą definicję, według której emisja akustyczna polega na powstawaniu fal sprężystych na skutek lokalnej, dynamicznej zmiany w strukturze materiału (pod wpływem bodźców mechanicznych, termicznych, chemicznych).

Sygnal emisji akustycznej jest generowany w materiale w wyniku wyzwania zmagazynowanej energii wewnętrznej. Fale sprężyste propagują do powierzchni ograniczających materiał, gdzie są rejestrowane. Źródłem emisji akustycznej mogą być, między innymi: ruchy defektów sieci krystalicznej (dyslokacji, wakansów, atomów wtrąconych), tworzenie i rozprzestrzenianie się mikropęknięć, lokalne ruchy ośrodka powodujące tarcie wewnętrzne.

Odbiornikami sygnału emisji akustycznej są najczęściej przetworniki piezoelektryczne. Dokonują one transformacji drgań, propagujących się w kierunku prostopadłym do ich powierzchni czołowej, na zmienne napięcie elektryczne. Zarejestrowany sygnał jest następnie poddawany obróbce elektronicznej. Do opisu sygnału stosuje się tzw. deskryptory czyli jego cechy charakterystyczne. Najczęściej są to: tempo zliczeń, średnia amplituda sygnału, średnia wartość napięcia skutecznego RMS. W metalach głównym źródłem emisji akustycznej są: powstawanie i rozwój mikropęknięć, ruch dyslokacji, odkształcenia plastyczne.

M. Marczak [5] zastosował metodę emisji akustycznej do identyfikacji biegu procesów tribologicznych w modelowych węzłach trących maszyn tarciovych. Biorąc pod uwagę średnią amplitudę sygnału emisji akustycznej w funkcji obciążenia (w standardowym aparacie czterokulowym) dla oleju parafinowego (OP) bez dodatku oraz zawierającego dwufunkcyjny dodatek przeciwzużyciowy i przeciwzatarciowy (Anglamol 99) stwierdził, że odzwierciedla ona wpływ dodatku na właściwości smarne badanego oleju (rysunek 1). Wynik ten wskazuje na możliwość stosowania metody emisji akustycznej do identyfikacji obecności w oleju dodatków smarnościowych oraz do oznaczania ich skuteczności.

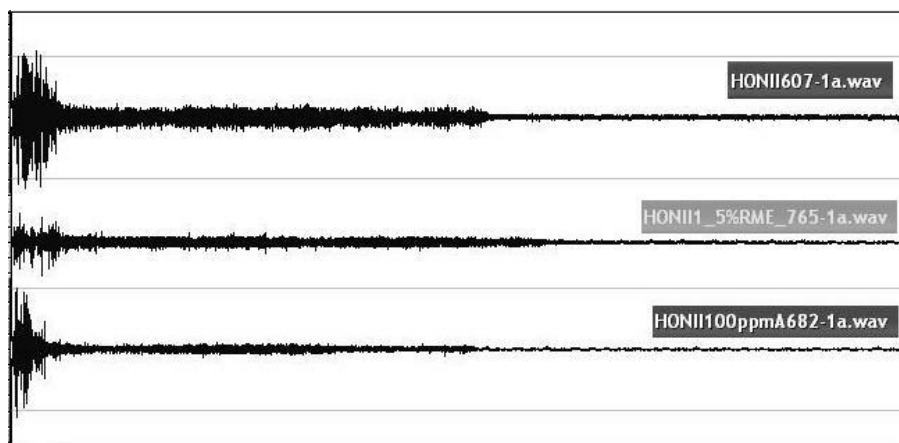


Rys. 1. Zależność średniej amplitudy sygnału EA od obciążenia [5]

Fig. 1. Mean acoustic emission signal amplitude versus load [5]

Badania sygnału emisji akustycznej w pracy [2] przeprowadzono podczas badań procesów tribologicznych za pomocą aparatu T-02. Sygnał wytwarzany w węźle tarcia był odbierany przez sensor przymocowany mechanicznie do ramienia uchwytu, które stanowiło dobry falowód. Każdy pomiar powtarzano trzykrotnie. Badano hydrorafinowany olej napędowy HON II bez dodatków oraz z dodatkami smarowościowymi. Rejestrowano sygnał emisji akustycznej podczas 30-sekundowych biegów badawczych przy obciążeniu nadanym równym obciążeniu zacierającemu. Następnie obliczano średnią amplitudę sygnału emisji akustycznej w półsekundowych przedziałach czasu.

Średnią amplitudę sygnału emisji akustycznej obliczano za pomocą programu Look 5, opracowanego w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN. Wybrane zapisy amplitudy sygnału emisji akustycznej przedstawiono na rysunku 2.



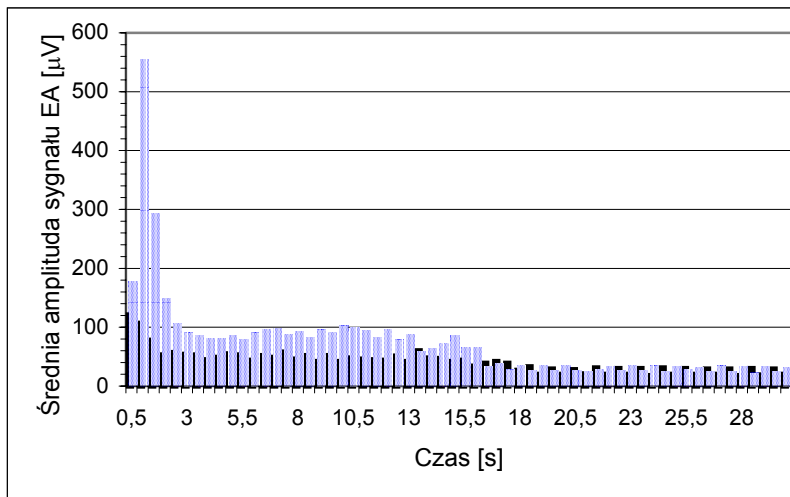
Rys. 2. Amplituda sygnału emisji akustycznej dla oleju HON II bez dodatków oraz z zawartością dodatku RME (1.5%) i dodatku A (100 ppm)

Fig. 2. Acoustic emission signal amplitude for the oil HON II without additives and with 1.5% RME and 100 ppm A

Zmiany średniej amplitudy sygnału emisji akustycznej podczas 30-sekundowych biegów badawczych, pod obciążeniem nadanym równym obciążeniu zacierającym, dla oleju HON II bez dodatków oraz z zawartością 100 ppm A i 1.5% RME przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

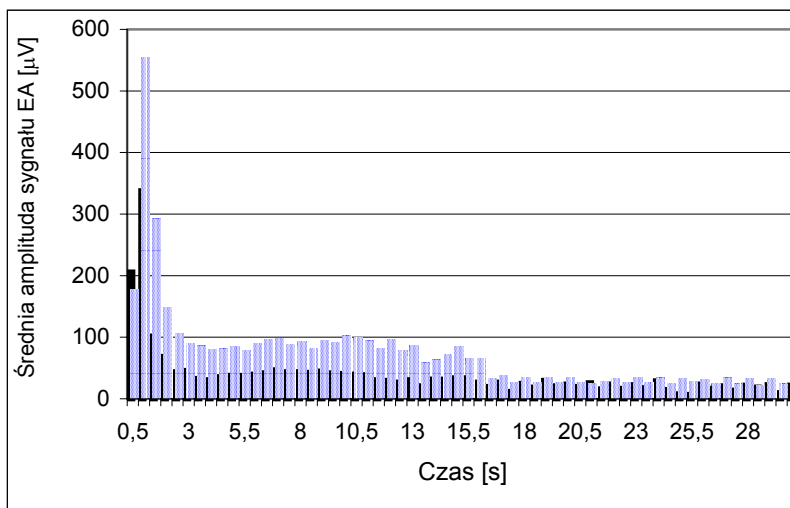
Efekty akustyczne przedstawione na tych rysunkach odzwierciedlają stan systemu tribologicznego. Na prezentowanych wykresach można wyróżnić trzy przedziały różniące się średnią amplitudą SEA. Pierwszy – w którym wysoka wartość amplitudy jest spowodowana zapoczątkowaniem zacierania układu (duża liczba kontaktów mikronierówności powierzchni elementów węzła tarcia), drugi – charakteryzujący proces docierania oraz trzeci – opisujący badany układ po dotarciu.

Wpływ dodatków smarnościowych jest najbardziej widoczny w dwu pierwszych przedziałach. Średnia amplituda SEA jest w tych przedziałach znacznie wyższa dla czystego oleju HON II niż dla tego samego oleju zawierającego dodatki (1.5% RME oraz 100 ppm A). Obniżenie wartości SEA spowodowane obecnością dodatków smarnościowych należy tłumaczyć tworzeniem się warstw granicznych i ich tłumiącym oddziaływaniem.



Rys. 3. Zmiany średniej amplitudy sygnału emisji akustycznej dla oleju HON II z dodatkiem 1.5% RME. Oznaczenia: linia jasna – HON II ($P_t = 607$ N), linia ciemna – HON II +1.5% RME ($P_t = 765$ N)

Fig. 3. Mean acoustic emission signal amplitude changes for the oil HON II containing 1.5% RME. Light line – HON II ($P_t = 607$ N), dark line – HON II +1.5% RME ($P_t = 765$ N)



Rys. 4. Zmiany średniej amplitudy sygnału emisji akustycznej dla oleju HON II z dodatkiem 100 ppm A. Oznaczenia: linia jasna – HON II ($P_t = 607$ N), linia ciemna – HON II +100 ppm A ($P_t = 682$ N)

Fig. 4. Mean acoustic emission signal amplitude changes for the oil HON II with 100 ppm A. Light line – HON II ($P_t = 607$ N), dark line – HON II +100 ppm A ($P_t = 682$ N)

Do ilościowego opisu tłumiącego oddziaływania dodatków smarnościowych wprowadzono współczynnik tłumienia amplitudy – k . Jest on równy ilorazowi:

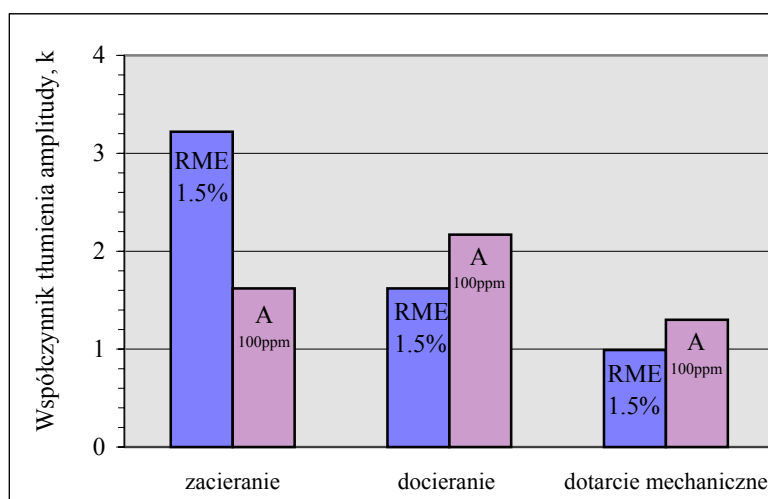
$$k = \frac{A}{A_d}$$

gdzie:

A – średnia amplituda SEA generowanego w węźle tarcia smarowanym olejem bez dodatku;

A_d – średnia amplituda SEA generowanego w węźle tarcia smarowanym olejem z zawartością dodatku.

Zdolność tłumienia amplitudy SEA przez dodatki A (w stężeniu 100 ppm) i RME (w stężeniu 1.5%) wprowadzone do oleju napędowego – wyrażoną za pomocą tego współczynnika, dla omówionych wyżej przedziałów, przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Wartości współczynnika tłumienia amplitudy SEA dodatków RME i A wprowadzonych do oleju HON II, dla trzech stanów systemu tribologicznego

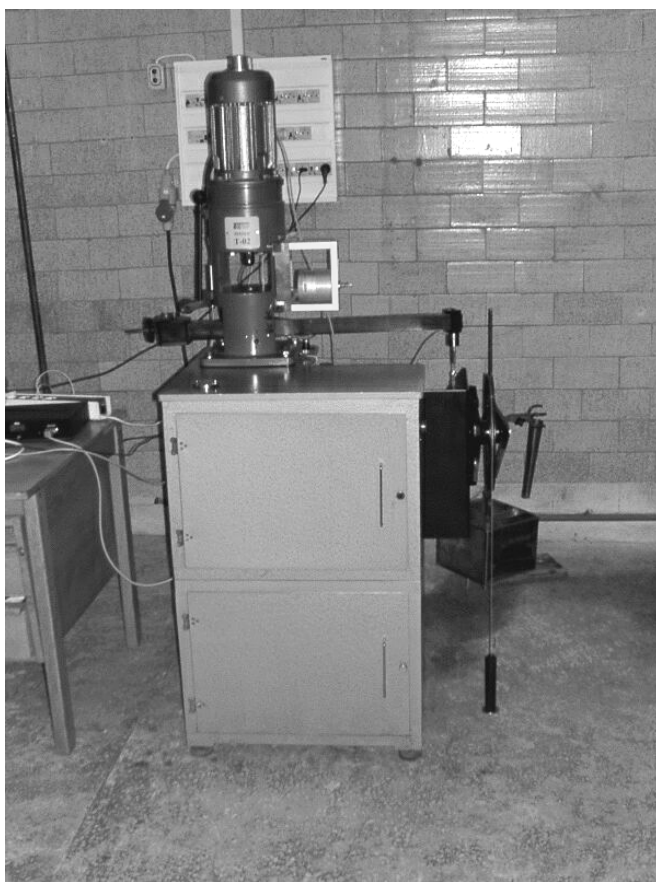
Fig. 5. Amplitude attenuation coefficient of acoustic emission signal for RME and A additives in the HON II oil, for three tribological system states

Należy sądzić, że w rzeczywistych warunkach eksploatacji, dodatki te wykazywałyby działanie przeciwtarciowe i przeciwzużyciowe.

Interesującą sprawą było weryfikowanie modelu w sytuacji, w której badania zostały przeprowadzone za pomocą standardowego aparatu czterokulowego zmodyfikowanego w Zakładzie Materiałów Smarowych i Paliw Instytutu Eksploatacji Pojazdów i Maszyn Politechniki Radomskiej

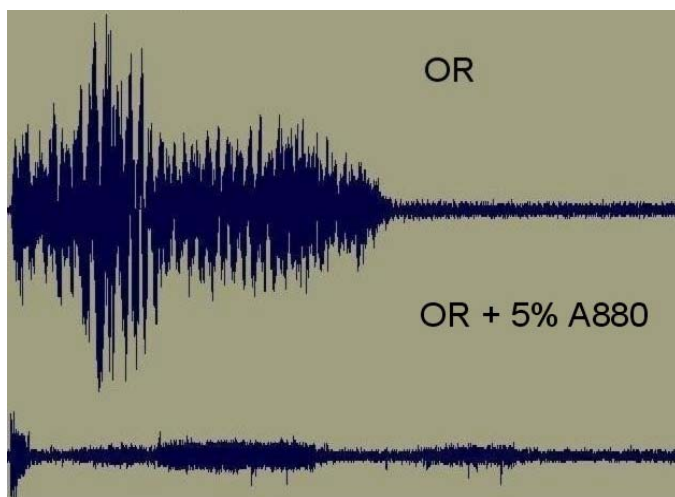
[6, 7]. Modyfikacja polegała na wyposażeniu aparatu w mechanizm umożliwiający zadawanie obciążenia w sposób liniowy. Ten wzrost jest realizowany za pomocą napływu wody do zbiornika obciążającego (rysunek 6).

W badaniach [7] jako olej bazowy zastosowano olej referencyjny RL 144/4, a jako dodatek smarnościowy Acorox 880 w stężeniu 5%. Procedura badawcza była taka sama jak podczas badania hydorafinowanego oleju napędowego HON II z tą różnicą, że czas trwania badań pod obciążeniem nadanym równym obciążeniu zacierającemu wynosił 100 sekund. Zapis amplitudy sygnału emisji akustycznej czystego oleju referencyjnego (OR) i z zawartością 5% dodatku Acorox 880 (OR + 5% A880) przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Aparat czterokulowy z zamontowanym mechanizmem ciągłego narastania obciążenia

Fig. 6. Four-ball apparatus with a mechanism of linear load increase



Rys. 7. Amplituda sygnału emisji akustycznej dla czystego oleju referencyjnego (OR) i z zawartością 5% dodatku Acorox 880 (OR + 5% A880)

Fig. 7. Acoustic emission signal amplitude for the reference oil (OR) without additives and with 5% Acorox 880 (OR + 5% A880)

PODSUMOWANIE

Jak można sądzić na podstawie uzyskanych wyników, model fizycznego przzerwania ciągłości warstwy granicznej w styku skoncentrowanym aparatu czterokulowego został pozytywnie zweryfikowany. Przeprowadzone badania potwierdziły wyniki uzyskane przez M. Marcza [5] stwierdzające, że przebiegowi każdego procesu tribologicznego towarzyszy właściwy mu sygnał emisji akustycznej. Każda zmiana w przebiegu procesu tarcia znajduje odbicie w odpowiedniej zmianie sygnału emisji akustycznej, w tym – w interesujących nas zmianach wielkości amplitudy tego sygnału. Na zmiany te wpływały zmiany w składzie środka smarującego (oleju bez dodatku i z dodatkiem) oraz gęstość energii tarcia. Przedstawiony w pracy współczynnik tłumienia amplitudy może być deskryptorem stanu systemu tribologicznego. Badania przedstawione w niniejszej pracy będą kontynuowane w Politechnice Radomskiej.

LITERATURA

1. Dieragin B.W.: Co to jest tarcie. PWN Warszawa 1956 (tłumaczenie z rosyjskiego. Red. Michał Halaunbrenner).

2. Wojtyniak M.: Metoda badania właściwości smarnych olejów napędowych. Rozprawa doktorska. Politechnika Radomska, Radom, 2003.
3. Oleksiak S.: Właściwości smarne paliw silnikowych – rozwój metod oceny i wzrost wymagań. Biuletyn ITN, 2000, Nr 4, s. 286-295.
4. Shuga'a A.K.: Badanie przeciwzużyciowych właściwości estrów kwasów karboksylo-wych i alkoholi alifatycznych jako dodatków smarnościowych do olejów napędowych najnowszej generacji. Rozprawa doktorska. Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej, Sulejówek 2003.
5. Marczak M.: Emisja akustyczna procesu tribologicznego. Rozprawa doktorska. Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej, Sulejówek 2001.
6. Stepień P.: Badania smarności olejów napędowych. Praca magisterska. Politechnika Radomska, Radom 2003.
7. Kopeć A.P.: Badanie wpływu dodatków smarnościowych do oleju bazowego na przebieg procesu tribologicznego i towarzyszący mu sygnał emisji akustycznej. Praca magisterska. Politechnika Radomska, Radom 2003.

Recenzent:
Jan BURCAN

Summary

The paper presents results of lubricity properties investigation obtained using two versions of the four-ball apparatus. Lubricity properties were estimated using a model of physical breaking of the lubricating layer in a concentrated contact and analyzing acoustic emission signal from the kinematic pair. The obtained results allowed to state that every run of tribological process is accompanied by its proper acoustic emission signal. Authors proposed application of coefficient of amplitude attenuation as a descriptor of the tribological system state.

Praca wykonana w ramach realizacji projektu badawczego nr 5T12C 058 23