

Wear of hydraulic system components assessment based on the analysis of hydraulic oil degradation degree

Ocena zużycia elementów układów hydraulicznych na podstawie analizy stopnia degradacji oleju hydraulicznego

DOI: 10.15199/62.2020.9.XX

Lubricating oils taken from 2 operational hydraulic lines were studied for acid no., contents of oxidn. and thermal degradn. products, water concn. as well as contents of solid particle (Cu, Pb, Fe) to evaluate the oil stability. The correlation anal. showed a significant relation between contents of solid particles and wear of the hydraulic system and between the acid no. and oil viscosity.

Kompleksowe testy mające na celu określenie okresu trwałości oleju w celu zapobiegania i wczesnej diagnostyki usterek układu hydraulicznego obejmują ciągłe monitorowanie degradacji oleju (lepkość kinematyczna w 40°C, liczba kwasowa, degradacja termiczno-oksydacyjna), zanieczyszczeń oleju (woda, klasa czystości), stężeń metali (Fe, Pb, Cu) w oleju i kształtu ich cząstek. Analiza korelacji potwierdziła znaczenie statystycznej zależności między zanieczyszczeniem oleju a zużyciem układu hydraulicznego.

Innowacyjny rozwój układów hydraulicznych z wykorzystaniem najnowszych materiałów i płynów hydraulicznych oraz elektroniki daje nowy impuls do postępu technicznego. Producenci cieczy hydraulicznych zaopatrują w nie wiele gałęzi przemysłu, w tym takie dzie-

dziny, jak m.in. obróbka drewna i maszyny rolnicze^{1,2}), przenośniki, przemysł chemiczny i spożywczy oraz produkcja opakowań. W ostatnich latach moc systemów hydraulicznych znacznie wzrosła. Znajduje to odzwierciedlenie w wyższym ciśnieniu, wyższej temperaturze pracy układu i jego mniejszych objętościach, które powodują zwiększenie cyrkulacji, a tym samym ciśnienia wywierane na media.

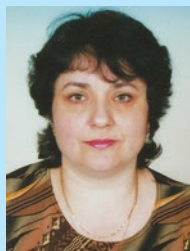
W układach hydraulicznych przenoszenie energii zapewnia płyn hydrauliczny. Energia ta służy do napędu, sterowania i ruchu³). Rozwój płynów hydraulicznych i ich właściwe stosowanie mają ogromne znaczenie gospodarcze. Optymalne zastosowania oszczędzają energię, skracają okresy konserwacji, zmniejszają zużycie, zwiększają żywotność maszyny i umożliwiają skuteczne oszczędności^{4,5}).

Ogólnie płyn hydrauliczny składa się z płynu bazowego (zwykle oleju bazowego i dodatków chemicznych). Jakość i wydajność płynu hydraulicznego zależą od jakości płynu bazowego i kombinacji zastosowanych dodatków lub ich systemów. Dodatki poprawiają niektóre właściwości, których płyn bazowy nie może zapewnić lub nie może zapewnić w wystarczającym stopniu. W odniesieniu do aspektów technicznych i środowiskowych o jakości oleju hydraulicznego decydować będzie rodzaj płynu bazowego i rodzaj dodatków.

Płyny hydrauliczne na bazie olejów mineralnych, płyny syntetyczne i płyny niepalne są stosowane we wszystkich typach maszyn i urządzeń. Płyny na bazie olejów mineralnych (oleje parafinowe, oleje naftenowe i oleje białe) i/lub ich mieszaniny są stosowane jako płyny bazowe lub oleje bazowe. Płyny syntetyczne na bazie olejów hydrokrakowanych, olejów polialfaolefinowych, olejów estrowych i poliglikoli są stosowane głównie w płynach ognioodpornych i szybko biodegradowalnych.



Mgr inż. Silvia KOPČANOVÁ w roku 2015 ukończyła studia w Wydziale Technologii Politechniki w Zwoleń. Jest doktorantem w Katedrze Mechaniki, Budowy Maszyn i Projektowania na Wydziale Technologii tej samej uczelni. Specjalność – wieloparametrowa diagnostyka maszyny.



Dr hab. inż. Marie SEJKOROVÁ w roku 1995 ukończyła studia inżynierskie w Wyższej Szkole Chemiczno-Technologicznej w Pradze, a następnie pracowała jako pracownik badawczy w dziedzinie rozwoju nowych metod analitycznych i procedur. Od 2001 r. pracuje na Wydziale Transportu Uniwersytetu w Pardubicach. Specjalność – badania stosowane w obszarze diagnostyki technicznej oraz wpływ transportu na środowisko naturalne.

* Autor do korespondencji:

Department of Transport Means and Diagnostics, Faculty of Transport Engineering, University of Pardubice, Studentská 95, 532 10 Pardubice, Czech Republic, e-mail: marie.sejkorova@upce.cz

Naturalne oleje roślinne, takie jak olej rzepakowy, często znajdują się w płynach szybko biodegradowalnych. Najważniejsze dodatki do płynów hydraulicznych to środki powierzchniowo czynne (SPC) oraz aktywne dodatki do oleju bazowego. SPC są stosowane jako inhibitory korozji, dezaktywatory metali, inhibitory zużycia, modyfikatory tarcia i dodatki detergentowo-dyspergujące, a aktywne dodatki do oleju bazowego to przeciwutleniające, środki przeciwpieniące, polepszacze wskaźnika lepkości i polepszacze temperatury krzepnięcia.

Analiza oleju stosowanego w systemach ciernych jest coraz częściej stosowana w urządzeniach przemysłowych⁶⁾ i transportowych⁷⁾. Obszerne informacje uzyskane podczas testowania olejów hydraulicznych wykazują introspektywne odbicie stanu maszyn i olejów. Monitorowanie stanu oleju w układzie hydraulicznym w czasie rzeczywistym jest jednym z najbardziej skutecznych środków zapobiegania i wczesnej diagnostyki uszkodzeń układu^{8, 9)}. Na degradację olejów wpływają głównie procesy utleniania, degradacja termiczna (gorące miejsca) i reakcje chemiczne zachodzące w rzeczywistych warunkach pracy maszyny. Procesy te występują w kontakcie z tlenem atmosferycznym w podwyższonych temperaturach, często w obecności wody, zanieczyszczeń metalicznych i niemetalicznych. Samemu procesowi utleniania towarzyszy obecność mniej stabilnych cząsteczek, które szybko się utleniają do kwaśnych produktów^{9, 10)}.

Zanieczyszczenie olejów hydraulicznych ma duży wpływ na niezawodność i żywotność układu hydraulicznego¹¹⁾. Główne źródła zanieczyszczeń to rozkład składników płynu wskutek zachodzących tam procesów degradacji, woda z układu chłodzącego lub kondensat powstały w wyniku znacznych zmian temperatury, a także cząstki pyłu. Uważa się jednak, że olej i maszynę¹²⁾ najbardziej niszczy zanieczyszczenie cząstkami stałymi. Do monitorowania czystości olejów hydraulicznych najczęściej stosuje się metody oparte na klasycznej filtracji, filtracji membranowej i liczeniu cząstek, w tym na określaniu rozkładu ich wielkości¹³⁾. Spektrometria w podczerwieni z transformacją Fouriera (spektrometria FTIR) jest tu bardzo przydatną metodą, którą można identyfikować oleje, monitorować ich degradację termiczno-oksydacyjną oraz monitorować zawartość dodatków i zanieczyszczeń^{14, 15)}. Utlenianie płynów hydraulicznych znajduje również odzwierciedlenie w zmianie wartości liczby kwasowej (LK)¹⁶⁾. Woda jest przyczyną emulgowania oleju i pęknięcia filmu smarowego, a także negatywnie wpływa na dodatki i powoduje korozję elementów wyposażenia. Nováček¹⁷⁾ stwierdza, że stężenie wody w olejach hydraulicznych nie powinno przekraczać 500 mg/kg, a inni autorzy¹⁸⁾ podają tu nawet 200–100 mg/kg. Zawartość wody (ZW) w oleju jest najczęściej określana przez miareczkowanie kulometryczne lub potencjometryczne metodą Karla Fischera.

Zanieczyszczenia są czynnikiem, który może wpływać na utlenianie oleju. Przy 1-proc. stężeniu osadu w płynie hydraulicznym szybkość utleniania podwaja się w porównaniu z płynem całkowicie pozbawionym osadu¹⁸⁾. Według Stopki¹⁹⁾ proces utleniania i degradacja termiczna są przyczyną degradacji oleju bazowego i powstawania miękkich zanieczyszczeń – osadów i laków (lepkich żywic), które osadzają się na funkcjonalnych powierzchniach układów hydraulicznych, gdzie tworzą ciągły nierozpuszczalny film.

Szybkie ciemnienie oleju hydraulicznego i zmiana jego naturalnego zapachu były impulsem do określenia poziomu potencjału powstawania produktów degradacji termicznej. Degradacja termiczna oleju hydraulicznego zachodzi, jeśli jest on długo poddawany działaniu temp. powyżej 80°C²⁰⁾. W niektórych miejscach temperatura oleju może osiągnąć nawet 10 000°C^{21, 22)} z powodu wyładowań elektrycznych generowanych przez elektryczność statyczną.

Oprócz stresu termicznego utlenianie jest najczęstszą przyczyną ciemnienia oleju, ale zgodnie z Weeks²³⁾ żaden z tych procesów nie musi oznaczać konieczności wymiany oleju hydraulicznego. Istnieje wiele czynników, w tym skład, warunki pracy i zanieczyszczenia, z których każdy może powodować znaczną zmianę koloru bez znaczącej degradacji oleju.

Uszkodzenia mechaniczne²⁴⁾ mogą powodować większość usterek i wadliwego działania układu hydraulicznego. Przystoje maszyn i urządzeń pociągają za sobą wysokie straty.

W pracy na konkretnym przykładzie dwóch linii manipulacyjnych w firmie Baljer & Zembrod przedstawiono możliwość zastosowania ciągłej analizy olejów hydraulicznych do diagnostyki ich aktualnego stanu oraz do prognozowania uszkodzeń układu hydraulicznego. Macierz korelacji monitorowanych parametrów olejów hydraulicznych wykorzystano do określenia stopnia zależności między degradacją oleju, zanieczyszczeniem oleju i zużyciem powierzchni tarcia.

Część doświadczalna

Obiekt badań

Zdiagnozowano układ hydrauliczny dwóch linii w firmie Baljer & Zembrod zaprojektowanych do manipulowania kłódami drewna. Była to linia numer 655 00 081 (zwana dalej „081”), która została uruchomiona w 2006 r., oraz linia numer 655 00 072 (zwana dalej „072”), uruchomiona w 2008 r. Linia manipulacyjna to pojazd kolejowy z zamontowanym dźwigiem i piłą. Wydajność pracy i jazdy jest osiągana elektrohydraulicznie. Mechanizm hydrostatyczny składa się z grupy elementów hydraulicznych, przez które pod ciśnieniem przepływa płyn, i obejmuje 2 otwarte i 2 zamknięte układy hydrauliczne. Objętość zbiornika płynu hydraulicznego wynosi 270 L.

Materiały

Przedmiotem badań był olej hydrauliczny AGIP OSO 46 sklasyfikowany zgodnie z normą²⁵⁾ jako HLP 46, a wg norm²⁶⁾ jako ISO-L-HM 46. Podstawowe parametry oleju podano w tabeli 1.

Próbki płynu hydraulicznego o temp. ok. 55°C pobrano z wanny olejowej za pomocą próżniowego urządzenia do pobierania próbek Bürkle, model Minisampler, do kolb o pojemności 250 mL. Urządzenie działało przez co najmniej 2 h przed pobraniem próbek.

Jakość oleju hydraulicznego, a pośrednio także stan układu hydraulicznego monitorowano przez rok, między dwiema wymianami wkładu hydraulicznego, z częstotliwością pojedynczych pobrań wynoszącą ok. 500 h pracy. W tabelach 2 i 3 zamieszczono dane dotyczące poszczególnych pobrań oleju hydraulicznego oraz czasu pracy monitorowanych linii manipulacyjnych.

Table 1. Basic physicochemical parameters of AGIP OSO46 hydraulic oils

Tabela 1. Podstawowe parametry fizyczno-chemiczne olejów hydraulicznych AGIP OSO 46

Parametr	Wartość
Lepkość kinematyczna w 40°C, mm ² /s	45,0
Lepkość kinematyczna w 100°C, mm ² /s	6,8
Wskaźnik lepkości	100
Punkt zamarzania, °C	-27
Liczba kwasowa, mg/g	0,59



Dr hab. inż. Marián KUČERA w roku 1998 ukończył studia w Wydziale Technologii Politechniki w Zwoleniu. Jest adiunktem w Katedrze Mechaniki, Budowy Maszyn i Projektowania na Wydziale Technologii Politechniki w Zwoleniu. Specjalność – badania stosowane w obszarze diagnostyki technicznej oraz wpływ płynów eksploatacyjnych na niezawodność maszyn.



Dr. inż. Michaela HNILICOVÁ w roku 2015 ukończyła studia doktoranckie na Wydziale Technologii Politechniki w Zwoleniu. Jest pracownikiem naukowo-badawczym w Katedrze Technologii Produkcji i Zarządzania Jakością tej samej uczelni. Specjalność – technologia i mechanizacja prac oraz inżynieria materiałowa.

Table 2. Information on samples of hydraulic oils from handling line 072

Tabela 2. Informacje o próbkach olejów hydraulicznych pobranych z linii 072

Numer odbioru oleju	Czas pracy linii, h	Czas pracy oleju, h
Wymiana oleju	15400	0
1	15892	492
2	16392	992
3	16907	1507
4	17389	1989
5	17882	2482
Wymiana oleju	18011	2611

Table 3. Information on samples of hydraulic oils from handling line 081

Tabela 3. Informacje o próbkach olejów hydraulicznych pobranych z linii 081

Numer odbioru oleju	Czas pracy linii, h	Czas pracy oleju, h
Wymiana oleju	20400	0
1	20916	516
2	21421	1021
3	21887	1487
4	22313	1913
5	22800	2400
Wymiana oleju	22924	2524

Metodyka badań

Do oceny jakości oleju hydraulicznego i stanu zużycia powierzchni ściernych linii manipulacyjnej przez ślad informacyjny w oleju badano degradację oleju, zanieczyszczenie oleju hydraulicznego oraz zużycie powierzchni ciernych.

Degradację oleju określano na podstawie lepkości kinematycznej w 40°C, zgodnie z normą²⁷⁾, wartości liczby kwasowej (LK) oznaczanej przez miareczkowanie potencjometryczne zgodnie z normą²⁸⁾, zawartości produktów utleniania (PU) oznaczanej metodą spektrometrii FTIR zgodnie z wewnętrzną normą laboratoryjną InterTriboDia, s.r.o. oraz zawartości produktów rozkładu termicznego (PT) oznaczanej przez filtrację próżniową oleju, a następnie ocenę barwy membrany zgodnie z wewnętrzną normą laboratoryjną InterTriboDia, s.r.o.

Poziom degradacji oksydacyjnej płynów hydraulicznych oceniano za pomocą spektrometrii FTIR. Przejawem obecności produktów utleniania⁷⁾ było pasmo spektralne grupy karbonylowej $-C=O$ z maksimum przy 1740 cm^{-1} .

Zanieczyszczenie oleju hydraulicznego określono poprzez oznaczenie zawartości wody (ZW) przez miareczkowanie kulometryczne zgodnie z normą²⁹⁾ i klasy czystości zgodnie z normą³⁰⁾ (licznik laserowy i klasyfikator kształtu cząstek Spectro Incorporated, model LaserNet Fines-C),

Ze względu na fakt, że zmiana klasy czystości płynów hydraulicznych była sygnałem powstawania cząstek, które mogły pogorszyć stan par ciernych linii manipulacyjnych, przeprowadzono analizę spektralną cząstek metali³¹⁾.

Zużycie powierzchni ciernych linii manipulacyjnej określono na podstawie analizy cząstek miedzi, ołowiu i żelaza przeprowadzonej metodą atomowej spektrometrii emisyjnej z indukcyjnie sprzężoną plazmą (AES-ICP)³²⁾, a także przez przypisanie

charakterystyk kształtu cząstek metali (licznik laserowy i klasyfikator kształtu cząstek Spectro Incorporated, model LaserNet Fines-C)³³⁾.

Opracowanie danych

Zmierzone parametry fizyczno-chemiczne charakteryzujące jakość oleju, jego zanieczyszczenie wodą i zanieczyszczeniami mechanicznymi oraz wyniki analizy pierwiastkowej produktów zużycia układu hydraulicznego wyrażono w postaci macierzy. Macierz zawierała również takie parametry, jak czas pracy linii i czas pracy oleju. Macierz źródłowa miała wymiar (10 × 13). Trzydzieści parametrów monitorowano w 10 próbach oleju AGIP OSO 46. Macierz źródłowa danych poddano analizie korelacji. Współczynnik korelacji (*R*) wskazał na istotność lub nieistotność zależności regresji między monitorowanymi parametrami olejów hydraulicznych.

Do analizy danych wykorzystano arkusz kalkulacyjny Microsoft Excel i program Statistica 10.0.

Wyniki badań i dyskusja

Podczas wizualnej kontroli linii manipulacyjnych w firmie Baljer & Zembrod stwierdzono, że nieszczelności powodowały wycieki oleju hydraulicznego. Podczas całorocznej pracy do układu w razie potrzeby dodawano olej hydrauliczny o objętości 10–30 L. W tabeli 4 podano wyniki ciągłych badań oleju hydraulicznego AGIP OSO 46 między dwiema wymianami wkładu hydraulicznego, z częstotliwością ok. 500 h pracy.

Za najważniejszy parametr olejów uznano lepkość kinematyczną¹⁵⁾ i każda jej zmiana, która przekraczała górną i dolną granicę miała negatywny wpływ na potencjalne awarie. Dla zastosowanego płynu hydraulicznego ostrzegawczą wartością graniczną lepkości kinematycznej w temp. 40°C była zmiana o ±5% w stosunku do lepkości świeżego oleju. Przekroczenia tej wartości granicznej nie zarejestrowano dla żadnej z monitorowanych linii manipulacyjnych. Rensselar³⁴⁾ jako wartość krytyczną określa zmianę lepkości kinematycznej o ±10% w stosunku do lepkości świeżego oleju.

Table 4. Results of evaluation of hydraulic oils continuously taken from both 072 and 081 handling lines

Tabela 4. Wyniki oceny olejów hydraulicznych pobieranych na bieżąco z linii 072 i 081

Parametr	L ₀₇₂ -1	L ₀₇₂ -2	L ₀₇₂ -3	L ₀₇₂ -4	L ₀₇₂ -5	L ₀₈₁ -1	L ₀₈₁ -2	L ₀₈₁ -3	L ₀₈₁ -4	L ₀₈₁ -5
CPL, h	15892	16392	16907	17389	17882	20916	21421	21887	22313	22800
CPO, h	492	992	1507	1989	2482	516	1021	1487	1913	2400
Degradacja oleju										
Lepkość, mm ² /s	46,5	46,5	46,3	46,1	46,0	46,8	46,9	46,6	46,6	46,6
LK, mg/g	0,72	0,78	0,82	0,85	0,84	0,68	0,68	0,69	0,70	0,79
PU, %	100	123	179	174	177	100	137	138	135	136
PT,	2	3	3	3	4	2	2	3	3	4
Zanieczyszczenie oleju										
ZW, mg/kg	63	57	63	73	78	58	59	59	73	85
>4	17	17	18	18	17	17	18	18	17	19
>6	16	16	16	17	16	16	17	16	16	17
>14	13	13	12	14	13	12	13	13	13	14
Zużycie powierzchni ciernych linii manipulacyjnej										
Cu, mg/kg	1,0	1,2	1,3	1,5	1,4	1,3	1,1	2,1	1,4	4,0
Pb, mg/kg	1,0	1,0	1,2	1,5	1,2	2,0	2,2	2,1	1,2	2,9
Fe, mg/kg	1,0	1,0	1,1	1,4	1,4	1,0	2,7	3,6	1,4	5,2

CPL – czas pracy linii; CPO – czas pracy oleju; L₀₇₂ – pobranie oleju z linii 072; L₀₈₁ – pobranie oleju z linii 081; lepkość kinematyczna w 40°C; LK – liczba kwasowa; PU – produkty utleniania; PT – produkty termiczne; ZW – zawartość wody; >4 – klasa czystości wyrażająca liczbę cząstek większych niż 4 μm; >6 – klasa czystości wyrażająca liczbę cząstek większych niż 6 μm; >14 – klasa czystości wyrażająca liczbę cząstek większych niż 14 μm; Cu – zawartość miedzi; Pb – zawartość ołowiu; Fe – zawartość żelaza

Ponieważ woda w oleju hydraulicznym zmieniała jego lepkość, zdolność do przenoszenia obciążeń, tworzenia filmu olejowego i powodowała korozję oraz tworzenie osadów i szlamów, jej stężenie określono przez miareczkowanie potencjometryczne metodą Karla Fischera. Wartość graniczna 200 mg/kg⁽⁸⁾ nie została przekroczona w żadnym z przypadków na obu liniach manipulacyjnych.

LK była również bardzo ważnym wskaźnikiem jakości zużytego oleju⁽³⁵⁾. Jej wartość wskazywała na zawartość wolnych kwasów w oleju, które były wynikiem jego zmian oksydacyjnych, a tym samym bezpośrednio określała stopień degradacji oleju. Oprócz kwasów karboksylowych produktami utleniania oleju były również aldehydy i ketony. W przypadku olejów hydraulicznych za wartość graniczną uznano wzrost LK o 0,4 mg/g próbki⁽⁴⁾, co nie zostało stwierdzone w żadnej z próbek oleju hydraulicznego w obu monitorowanych liniach. Wzrost wartości LK o 0,2 mg/g wykryto w próbkach 1–3 w przypadku linii 072 i w ostatniej próbce w przypadku linii 081. Wyniki te były zgodne z wynikami spektrometrii FTIR (rysunek).

W przypadku linii manipulacyjnej 072 stężenia Fe, Pb i Cu w oleju nie przekroczyły wartości dopuszczalnej. W przypadku linii manipulacyjnej 081 przekroczenie granicznego stężenia Fe odnotowano w piątym próbkowaniu, a potencjalnym źródłem tego metalu mogło być zużycie łożysk⁽³⁷⁾. Z monitorowanych parametrów zużycie par ciernych mechanizmu hydraulicznego najlepiej opisywał wzrost zawartości Cu i Pb, które były elementem konstrukcyjnym łożysk ślizgowych. Jednocześnie stwierdzono zwiększony wzrost zawartości zanieczyszczeń mechanicznych. Przyczynę uszkodzenia sprzętu hydraulicznego potwierdzono przez identyfikację cząstek laminarnych i zmęczeniowych, typowych dla uszkodzeń łożysk. Zawartość Cu zbliżyła się do wartości dopuszczalnych i z diagnostycznego punktu widzenia trzeba będzie zwrócić uwagę na hydrogeneratory.

Analiza macierzy korelacji wykazała statystyczne powiązania między monitorowanymi parametrami oleju. W tabeli 5 przedstawiono macierz korelacji między degradacją oleju, zawartością w nim zanieczyszczeń i zużyciem powierzchni ciernych. Wartości współczynnika regresji *R* z przedziału <0,9–1> wskazują na bardzo istotną korelację,

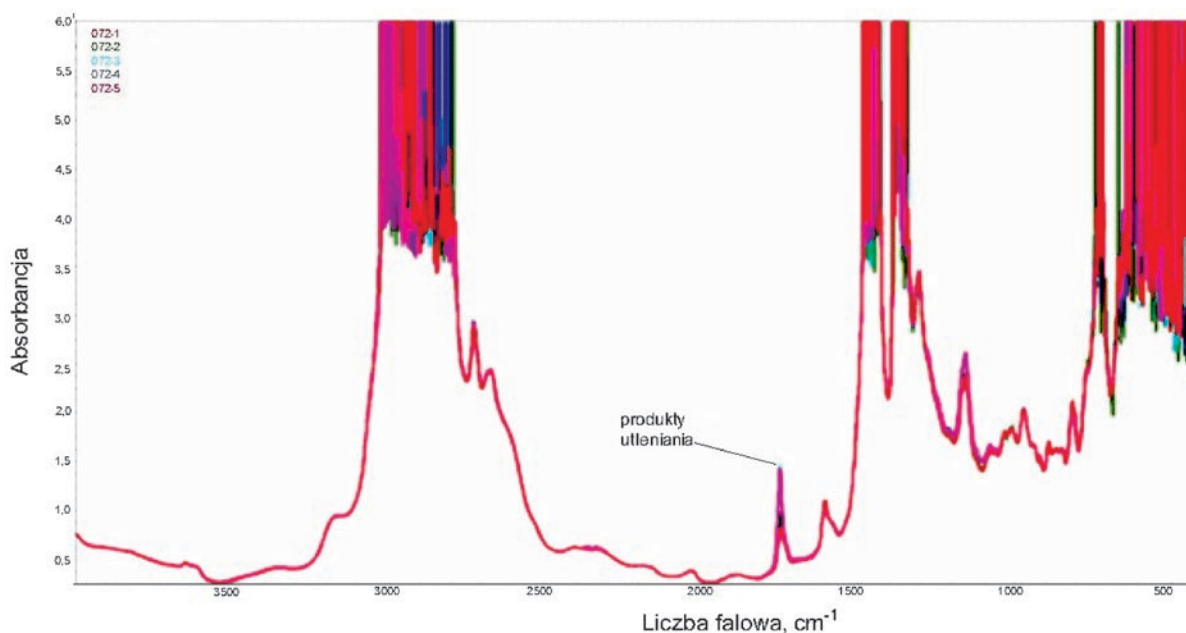


Figure. Infrared spectra of hydraulic oils from handling line 072

Rysunek. Widma w podczerwieni olejów hydraulicznych pobranych z linii 072 (drgania rozciągające C=O produktów utleniania: aldehydów, ketonów i kwasów)

Wyniki przedstawione w tabeli 4 pokazują, że w obu liniach odnotowano dużą zawartość produktów degradacji w ostatnim, piątym próbkowaniu. Olej był łatwo degradowalny termicznie i stwierdzono w nim krytyczną ilość żywy.

Do oznaczania zanieczyszczeń mechanicznych w monitorowanych olejach hydraulicznych zastosowano analizator laserowy i klasyfikator cząstek⁽³⁶⁾ w celu określenia klasy czystości zgodnie z normą⁽³⁰⁾, której podstawą było określenie liczby cząstek większych niż 4 μm, niż 6 μm i niż 14 μm w 1 mL cieczy. Ocenę oparto na górnych limitach ostrzegawczych poszczególnych klas wielkości tej normy, podanych przez producenta linii manipulacyjnych. Aby zagwarantować funkcjonalność całego układu zachowano klasę czystości 18/16/13, zgodnie z normą⁽³⁰⁾. Z danych przedstawionych w tabeli 4 wynika, że w linii manipulacyjnej 072 klasa czystości została nieznacznie przekroczona przy czwartym pobraniu oleju. Wartość klasy czystości przy piątym pobraniu oleju z linii manipulacyjnej 081 przekroczyła wartość dopuszczalną, a z punktu widzenia zanieczyszczenia ta klasa czystości oleju hydraulicznego była uważana za niepożądaną.

Table 5. Correlation matrix of monitored parameters

Tabela 5. Macierz korelacji monitorowanych parametrów

Parametr	CPL	CPO	Lepkość	LK	PU	PT	ZW	>4	>6	>14	Cu	Pb	Fe
CPL	1	0,3	0,6	-0,5	-0,2	0,1	0,2	0,4	0,3	0,1	0,6	0,8	0,7
CPO	0,3	1	-0,6	0,6	0,7	0,9	0,9	0,4	0,3	0,5	0,6	0,2	0,4
Lepkość	0,6	-0,6	1	-0,9	-0,7	-0,6	-0,5	0,1	0,1	-0,2	0,1	0,5	0,3
LK	-0,5	0,6	-0,9	1	0,7	0,7	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	-0,3	-0,1
PU	-0,2	0,7	0,7	0,7	1	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1	-0,1	0,0
PT	0,1	0,9	-0,6	0,7	0,6	1	0,8	0,3	0,1	0,5	0,6	0,1	0,4
ZW	0,2	0,9	-0,5	0,5	0,4	0,8	1	0,4	0,4	0,6	0,6	0,2	0,4
>4	0,4	0,4	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	1	0,7	0,5	0,8	0,8	0,8
>6	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,1	0,4	0,7	1	0,7	0,4	0,6	0,5
>14	0,2	0,6	-0,2	0,3	0,2	0,5	0,6	0,5	0,7	1	0,5	0,3	0,5
Cu	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,6	0,6	0,8	0,4	0,5	1	0,8	0,9
Pb	0,8	0,2	0,5	-0,2	-0,1	0,1	0,2	0,8	0,6	0,3	0,8	1	0,9
Fe	0,7	0,4	0,3	-0,1	0,0	0,4	0,4	0,8	0,5	0,5	0,9	0,9	1

– istotność statystyczna na poziomie $\alpha < 0,05$

z przedziału $<0,8-0,9$) na dość istotną, a w zakresie wartości $<0,5-0,8$) na korelację umiarkowanie istotną. Dla wartości $R < 0,5$ zależność uznawano za nieistotną¹⁵⁾.

Analiza korelacji wykazała statystyczną nieistotność między parametrami charakteryzującymi degradację oleju a parametrami charakteryzującymi stan układu hydraulicznego. Przeciwnie, na poziomie istotności $\alpha < 0,05$ parametry charakteryzujące procesy degradacji fizyczno-chemicznej zachodzące w płynie hydraulicznym istotnie ze sobą korelowały, np. LK korelowała bardzo istotnie z lepkością w 40°C, a korelacja z parametrami PU i PT była umiarkowanie znacząca. W macierzy korelacji możliwe było również prześledzenie zależności między parametrami charakteryzującymi stan układu hydraulicznego (zanieczyszczenie oleju i zużycie układu hydraulicznego). Na przykład zawartość Cu istotnie korelowała z zawartością Fe, Pb i liczbą cząstek większych niż 4 μm . Średnia korelacja istniała również z parametrem ZW.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały znaczenie monitorowania olejów hydraulicznych stosowanych w urządzeniach do obróbki drewna, a także na znaczenie prowadzenia kompleksowych analiz i prawidłowej interpretacji wyników pomiaru jako całości. Wykazano, że kompleksowe badania w celu określenia trwałości oleju, zapobiegania i wczesnej diagnostyki usterek układu hydraulicznego obejmują monitorowanie procesu degradacji oleju na podstawie oznaczenia lepkości w 40°C, liczby kwasowej, degradacji termiczno-utleniającej, monitorowania zanieczyszczeń (woda, klasa czystości), stężenia cząstek metali (Fe, Pb, Cu) i przypisania kształtu cząstek stałych.

Analiza korelacji ujawniła statystyczną nieistotność związku między parametrami charakteryzującymi degradację oleju a parametrami charakteryzującymi zużycie układu hydraulicznego. Przeciwnie, potwierdzono istotną korelację między czasem pracy urządzenia hydraulicznego, zanieczyszczeniem oleju (liczbą cząstek o wielkości ponad 4 μm i cząstkami zużycia (Fe, Pb, Cu)). Monitorowanie trendów tych parametrów można zatem wykorzystać jako sygnał diagnostyczny do przewidywania problemów z łożyskami, obudową łożysk ślizgowych lub hydrogeneratorem. Analiza korelacji parametrów fizyczno-chemicznych oleju potwierdziła umiarkowanie istotną zależność ($R = 0,7$) między LK a produktami degradacji termiczno-oksydacyjnej. Bardzo istotny związek pośredni ($R = 0,9$) został potwierdzony między LK i lepkością w 40°C. Na tej podstawie można stwierdzić, że zachodzi proces krakowania cząsteczek węglowodorów oleju, co przejawia się spadkiem lepkości.

Badania te zostały wsparte przez agencję grantową VEGA w ramach projektu nr 1/0642/18 „Analiza wpływu elementów budowlanych części mechanizmów leśnych na środowisko leśne w odniesieniu do wymagań energetycznych i ekologicznych” oraz Uniwersytet w Pardubicach w ramach projektu SGS nr 009_2020.

Otrzymano: 21-05-2020

LITERATURA

- [1] R. Majdan, M. Olejár, R. Abrahám, V. Šarac, D. Uhrinová, M. Jánošová, J. Nosian, *Tribol. Ind.* 2018, **40**, nr 2, 183.
- [2] R. Majdan, R. Abrahám, D. Uhrinová, J. Nosian, *Agronomy Res.* 2019, **17**, 1107.
- [3] B. Kopiláková, J. Turza, L. Hujo, J. Kosiba, *Tribol. Ind.* 2017, **39**, nr 1, 129.
- [4] T. Dziubak, P. Szczepaniak, *Arch. Motor.* 2017, **78**, nr 4, 43.
- [5] P. Jilek, I. Šefčík, J. Verner, J. Berg, *Mat. 18th Intern. Sci. Conf. "Engineering for Rural Development"*, Jelgava (Łotwa), 22–24 maja 2019 r., 1876.
- [6] J. Wilczarska, E. Kuliś, M. Łukasiewicz, Ł. Fornal, N. Dluhunovych, *MATEC Web Conf.* 2018, **182**, 01026.
- [7] M. Sejkorová, I. Hurtová, J. Glos, J. Pokorný, *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2017, **65**, nr 2, 481.
- [8] K. Władzielczyk, P. Kipczak, *New Trends Prod. Eng.* 2019, **2**, nr 1, 130.
- [9] A. Rezasoltani, M.M. Khonsari, *Lubricants* 2016, **4**, nr 3, 34.
- [10] M. Sejkorová, *Chem. Listy* 2013, **107**, nr 8, 643.
- [11] M. Singh, G.S. Lathkar, S.K. Basu, *J. Inst. Eng. India Ser. C* 2012, **93**, nr 3, 269.
- [12] R. Zhang, X. Yu, Y. Hu, H. Zang, W. Shu, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2017, **96**, nr 5–8, 1693.
- [13] V. Karanović, M. Jovanović, S. Baloš, D. Knežević, I. Mačužić, V. Karanović, M.J.S.B.D. Knežević, I. Mačužić, *Strojnicki Vest. J. Mech. Eng.* 2019, **65**, nr 3, 139.
- [14] I. Hurtová, M. Sejkorová, *Perner's Contacts* 2016, **11**, nr 4, 47.
- [15] M. Sejkorová, B. Šarkan, J. Caban, A. Marczuk, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 1, 49.
- [16] A. Wolak, *Meas. Control* 2018, **51**, nr 3–4, 65.
- [17] V. Nováček, *Tribotech. Inf.* 2011, **2**, 18.
- [18] N.K. Myshkin, L.V. Markova, *On-line condition monitoring in industrial lubrication and tribology*, Springer International Publishing, 2018.
- [19] J. Stopka, *Strojárstvo Strojrenství* 2013, **3**, 29.
- [20] T. Abekawa, Y. Tanikawa, A. Hirose, *Komatsu Technical Report. Yumpu: Komatsu, Japan* 2010, **56**, nr 163, 36.
- [21] G. Livingstone, G. Cavanaugh, *Tribol. Lubrication Technol.* 2015, **71**, nr 7, 44.
- [22] M. Soukup, *Tribotechnika* 2009, **1**, 26.
- [23] J. Weeks, *Why hydraulic oil changes colour*, <https://www.machinerylubrication.com/Read/30495/hydraulic-oil-color>, dostęp 15 maja 2020 r.
- [24] M. Walczak, J. Caban, A. Marczuk, *Agric. Eng.* 2017, **21**, nr 1, 95.
- [25] DIN 51524-2017, *Pressure fluids. Hydraulic oils. Part 2: HLP hydraulic oils, Minimum requirements*.
- [26] STN EN ISO 6743-4-2015, *Maziva, priemyselné oleje a príbuzné výrobky (trieda L). Klasifikácia. Časť 4: Skupina H (hydraulické systémy)*.
- [27] STN EN ISO 3104 + AC/O-1999, *Ropné výrobky. Priehľadné a nepriehľadné kvapaliny. Stanovenie kinematickej viskozity a výpočet dynamickej viskozity*.
- [28] STN 65 6214-1986, *Ropné výrobky. Stanovenie neutralizačného čísla potenciometrickou titráciou*.
- [29] STN EN ISO 12937-2003, *Ropné výrobky. Určovanie vody. Karl Fischerova coulometrická titračná metóda*.
- [30] ISO 4406-2017, *Hydraulic fluid power. Fluids. Method for coding the level of contamination by solid particles*.
- [31] G. Zajac, A. Wolak, J. Szyszlak-Barglowicz, *Przem. Chem.* 2018, **97**, nr 5, 788.
- [32] A. Wolak, G. Zajac, W. Gołębowski, *Pet. Sci. Technol.* 2019, **37**, nr 1, 93.
- [33] M. Valach, J. Mareček, Z. Hlaváčová, P. Trávníček, J. Glos, *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.* 2013, **61**, nr 3, 813.
- [34] J. Van Rensselar, *Tribol. Lubrication Technol.* 2015, **71**, nr 6, 58.
- [35] S.S. Kalligeros, *Machines* 2014, **2**, nr 1, 1.
- [36] M. Kučera, Z. Aleš, *Acta Technologica Agriculturae* 2017, **20**, nr 3, 57.
- [37] F. Ng, J.A. Harding, J. Glass, *Mech. Syst. Signal Proc.* 2017, **83**, 176.