



## **Eksperymentalne badania elektroreologicznych właściwości olejów smarnych zawierających ciecz jonową.**

### **Część 3. Mikroskopowe badania mechanizmu efektu ER**

JAROSŁAW JUDA, TADEUSZ KAŁDOŃSKI, KRZYSZTOF GOCMAN,  
TOMASZ JAN KAŁDOŃSKI, CZESŁAW PAKOWSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Mechanicznej,  
00-908 Warszawa ul. gen. S. Kaliskiego 2, tomasz.kaldonski@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki obserwacji mikroskopowych *in situ* quasi-homogenicznych mieszanin węglowodorowych zawierających wybraną ciecz jonową. Badania przeprowadzono na mikroskopie optycznym NIKON ECLIPSE LV100 D. Obserwowano mechanizm generowania efektu ER w dwóch mieszaninach, tj. silikonowej cieczy tłumiącej GP-1 zawierającej 2% (v/v) cieczy jonowej CJ 001 (tetrafluoroboranu 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowego oraz oleju bazowego polialfaolefinowego PAO-6 zawierającego 2% (v/v) cieczy jonowej CJ 008, tj. triheksylotetradecylofosfonowego bis(trifluorometylosulfo-nylo)-imidu) oraz cieczy wzorcowej dwuskładniowej LID3354 s. Przeprowadzone obserwacje wykazały, że wytworzone mieszaniny generowały efekt ER. Przy wartości progowej  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  efekt ER zanikał. Przedstawione w pracy fotografie dokumentują zachodzące pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego zmiany struktury mieszanin zawierających ciecze jonowe, polegające na tworzeniu „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych” i następnie na ich destrukcji oraz gromadzeniu się cząstek cieczy jonowej przy elektrodach.

**Słowa kluczowe:** efekt elektroreologiczny (ER), oleje smarne, ciecze jonowe, mikroskopia  
DOI: 10.5604/01.3001.0014.8872

## **1. Wprowadzenie**

W części 1 eksperymentalnych badań właściwości elektroreologicznych (ER) olejów smarnych zawierających ciecz jonową [1] stwierdzono występowanie efektu ER

w dwóch mieszaninach, tj. w silikonowym oleju tłumiącym GP-1 [2] zawierającym 2% (v/v) cieczy jonowej CJ 001 (tetrafluoroboranu 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowego [3]) oraz w bazowym oleju polialfaolefinowym PAO-6 [4] zawierającym 2% (v/v) cieczy jonowej CJ 008 (triheksyloteradecylofosfoniowego bis-trifluorometylosulfonylo imidu [5]). Dobór składników obu mieszanin bazował na wynikach badań mieszalności i ocenie podstawowych właściwości fizykochemicznych [1]. W przypadku mieszaniny GP1 + CJ 001 w temperaturze 25°C gęstość cieczy izolującej wynosiła  $\rho = 0,823 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , a dodanej cieczy jonowej CJ 001 —  $\rho = 1,116 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Natomiast w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ 008 w temperaturze 25°C gęstość PAO-6 wynosiła  $\rho = 0,816 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , a cieczy jonowej CJ 008  $\rho = 1,061 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

W temperaturze 25°C lepkość dynamiczna cieczy izolującej GP-1 wynosiła  $\eta = 12,61 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , a dodanej cieczy jonowej CJ 001 —  $\eta = 552,42 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ . W drugiej mieszaninie olej bazowy PAO-6 miał lepkość  $\eta = 47,36 \text{ mP}\cdot\text{s}$ , a ciecz jonowa CJ 008 —  $\eta = 327,24 \text{ mP}\cdot\text{s}$ . Łatwo zauważyć, że różnica lepkości składników mieszaniny jest niemal dwa razy mniejsza w drugim przypadku.

Badania właściwości ER obu mieszanin były przeprowadzane na zmodernizowanym reometrze Brookfield DV-III Ultra, przystosowanym do badań elektroreologicznych. Szczegóły tej modernizacji i zasadę pomiaru opisano w pracach [1, 6÷8]. Badania elektroeologiczne wykazały, że obie mieszaniny generowały odmienne charakterystyki reologiczne  $\tau = f(\dot{\gamma})$ . Pierwsza z nich, tj. GP-1 + CJ 001, przy braku pola elektrycznego zachowywała się jak ciecz Bingham (  $\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$  ), a w obecności pola elektrycznego do wartości  $E = 0,2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  charakterystyka reologiczna mogła być opisana równaniem Herschela-Bulkeya ( $\tau = m_1 \cdot \dot{\gamma}^{n_1} + \tau_0$ ) przy wykładniku  $n_1 < 1$ , typowym dla lepkoplastycznej cieczy pseudoplastycznej. Druga mieszanina, tj. PAO-6 + CJ 008, przy braku pola elektrycznego zachowywała się jak ciecz newtonowska ( $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$ ), natomiast w obecności pola elektrycznego do wartości  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  jej charakterystyka reologiczna mogła być opisana potęgowym równaniem Ostwalda-de Waele'a ( $\tau = m_2 \dot{\gamma}^{n_2}$ ) przy wykładniku  $n_2 < 1$  typowym dla lepkiej cieczy pseudoplastycznej [1].

Efekt elektroeologiczny był niestety w obu przypadkach krótkotrwały i niepowtarzalny dla tej samej próbki badanej cieczy. Efekt ER zanikał przy natężeniu pola elektrycznego  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Sugerowało to istotne zmiany struktury wewnętrznej badanych mieszanin poddanych działaniu stałego pola elektrycznego. Zdecydowano się na przeprowadzenie szczegółowych badań w spektroskopii dielektrycznej, stosując analizator impedancji HP4192 A firmy Hewlett Packard (USA). Wyniki opisano w pracy [9]. Oceniono zmienność stałych dielektrycznych ( $\epsilon$ ) oraz rezystancji ( $R$ ) i konduktywności ( $\sigma$ ) w funkcji częstotliwości ( $f$ ) stałego pola elektrycznego BIAS-u (DC) dla różnych wartości przyłożonego napięcia ( $U$ ). Wykonano również testy powtarzane na tych samych próbkach mieszanin ER w celu zaobserwowania, jak pierwotnie przyłożone pole BIAS-u wpływa na dalsze

zachowanie cieczy w polu elektrycznym. W tych badaniach potwierdzono powstanie efektu ER oraz symptomy zmian struktury wewnętrznej badanych mieszanin, prowadzące do zaniku efektu ER w oleju zawierającym ciecz jonową. Zwiększanie napięcia BIAS-u (DC) powodowało coraz większe i szybsze zmiany objawiające się m.in. spadkiem wartości ( $\epsilon$ ) mieszaniny w funkcji częstotliwości ( $f$ ), aż do zakresu typowego dla cieczy izolujących i dielektrycznych. Znacznie bardziej gwałtowny i intensywny spadek wartości ( $\epsilon$ ) występował w przypadku cieczy jonowej CJ 001 niż cieczy jonowej CJ 008. Może to być jedna z pośrednich przyczyn uzyskania słabszego efektu ER dla mieszaniny zawierającej ciecz jonową CJ 001 [1]. Ponadto w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ 008 rejestrowano nie tylko spadek wartości ( $\epsilon$ ), lecz także chwilowy wzrost ( $\epsilon$ ) pod wpływem działania napięcia  $U > 0$ , co oznaczało ciągłą zmianę właściwości dielektrycznych (niestabilność) [9]. Miało to prawdopodobnie wpływ na wielokrotnie lepsze właściwości ER mieszaniny PAO-6 + CJ 008 od mieszaniny GP-1 + CJ 001 [1, 9]. W celu rozpoznania mechanizmu powstania i zaniku efektu ER w takich mieszaninach postanowiono przeprowadzić badania mikroskopowe *in situ* podczas działania zewnętrznego pola elektrycznego.

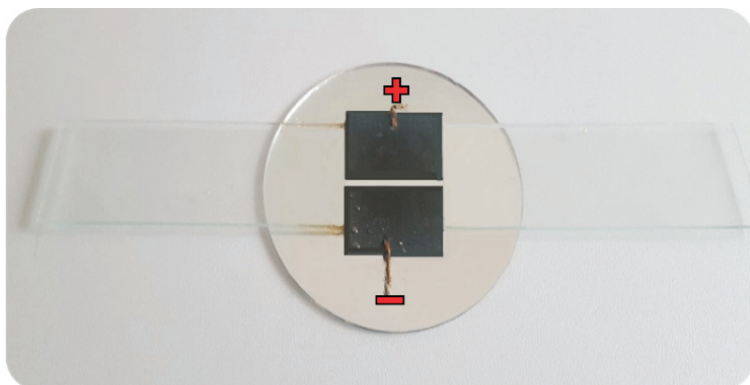
## 2. Metoda i zakres badań mikroskopowych

Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono na japońskim mikroskopie optycznym NIKON ECLIPSE LV100 D, pokazanym na rysunku 1. Mikroskop wyposażony był w obiektywy serii CFI (Achromat i Plan Fluor) o powiększeniach od  $2,5 \times$  do  $150 \times$ , okular  $10 \times 22$  mm, nasadkę trinokularową do foto i wideo, zmotoryzowany (osie X, Y, Z) stolik Prior ProScan H1P1, uchwyt rewolwerowy pięciopozycyjny. Mikroskop umożliwia rejestrację obrazu w technice jasnego i ciemnego pola, światła spolaryzowanego, kontrastu Nomarskiego i fluorescencji. Obserwacje próbek prezentowanych w tej pracy prowadzono w świetle przechodzącym. Do rejestracji fotografii oraz wideo mikroskop sprzężony jest z komputerem PC (z zainstalowanym oprogramowaniem do analizy obrazu NIS-AR).

Do przeprowadzenia obserwacji *in situ* wykonano „naczynie” z elektrodami (rys. 2), do którego wlewano badaną ciecz. Elektrody były zasilane prądem stałym przez zasilacz wysokonapięciowy HCP14-6500 firmy FUG Elektronik GmbH, będący również elementem składowym wcześniej opisanego w pracy [1] stanowiska ze zmodernizowanym wiskozymetrem Brookfield DV-III Ultra. Obserwacja była prowadzona w świetle przechodzącym, przy powiększeniu obiektywu  $\times 50$  z wykorzystaniem techniki jasnego pola, w temperaturze  $T \approx 25^\circ\text{C}$  i przy wilgotności powietrza ok. 55%.



Rys. 1. Mikroskop optyczny NIKON ECLIPSE LV100 D współpracujący z komputerem PC



Rys. 2. Naczynie szklane z elektrodami

W celu obserwacji kolejność czynności była następująca:

- 1) Przygotowano do pracy mikroskop Nikon Eclipse LV 100 D;
- 2) „Naczynie”, do którego wlewano obserwowaną ciecz, przemyto benzyną ekstrakcyjną i acetonem;
- 3) Następnie „naczynie” pomiarowe zostało podłączone do zasilacza wysokiego napięcia i osadzone na statywie mikroskopu;
- 4) Za pomocą pipety wprowadzono do „naczynia” wybraną ciecz w takiej ilości, żeby pokryła całą powierzchnię pomiędzy elektrodami;

- 5) Przeprowadzono obserwację, wykonując równocześnie niezbędne sekwencje zdjęć, zasilając elektrody stałym prądem o natężeniu pola elektrycznego  $E = 0 \div 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , tj. dla identycznego natężenia pola elektrycznego jak w badaniach reometrem Brookfielda [1];
- 6) Po zakończeniu obserwacji obniżono zasilanie prądem stałym do wartości  $E = 0 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , wyłączono zasilacz wysokiego napięcia, zdemontowano „naczynie”, usunięto z niego badaną ciecz i przemyto je benzyną ekstrakcyjną i acetonem, przygotowując do kolejnego badania.

Badania mikroskopowe przeprowadzono dla sporządzonych mieszanin ER, tj. GP-1 + CJ 001 i PA0-6 + CJ 008 oraz dla cieczy wzorcowej dwufazowej LID3354s będącej dyspersją cząstek polimerowych o średnicy do  $45 \mu\text{m}$  w oleju silikonowym [10]. Realizacja tych badań wiązała się z wieloma trudnościami technicznymi dotyczącymi uchwycenia w obiektywie chwilowych zmian w cieczy poddanej działaniu stałego zewnętrznego pola elektrycznego, zmiany jego natężenia od 0 do  $0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  i równoczesnego wykonywania kolejnych sekwencji zdjęć. Próby musiały być wielokrotnie powtarzane z wykorzystaniem ciągle nowych porcji badanych mieszanin. Przeprowadzone obserwacje i uzyskane fotografie w zadowalający sposób dokumentują zachodzące pod wpływem działania zewnętrznego pola elektrycznego zmiany struktury mieszanin zawierających ciecze jonowe, polegające na tworzeniu „łańcuchów fibrylowych” i następnie na ich destrukcji.

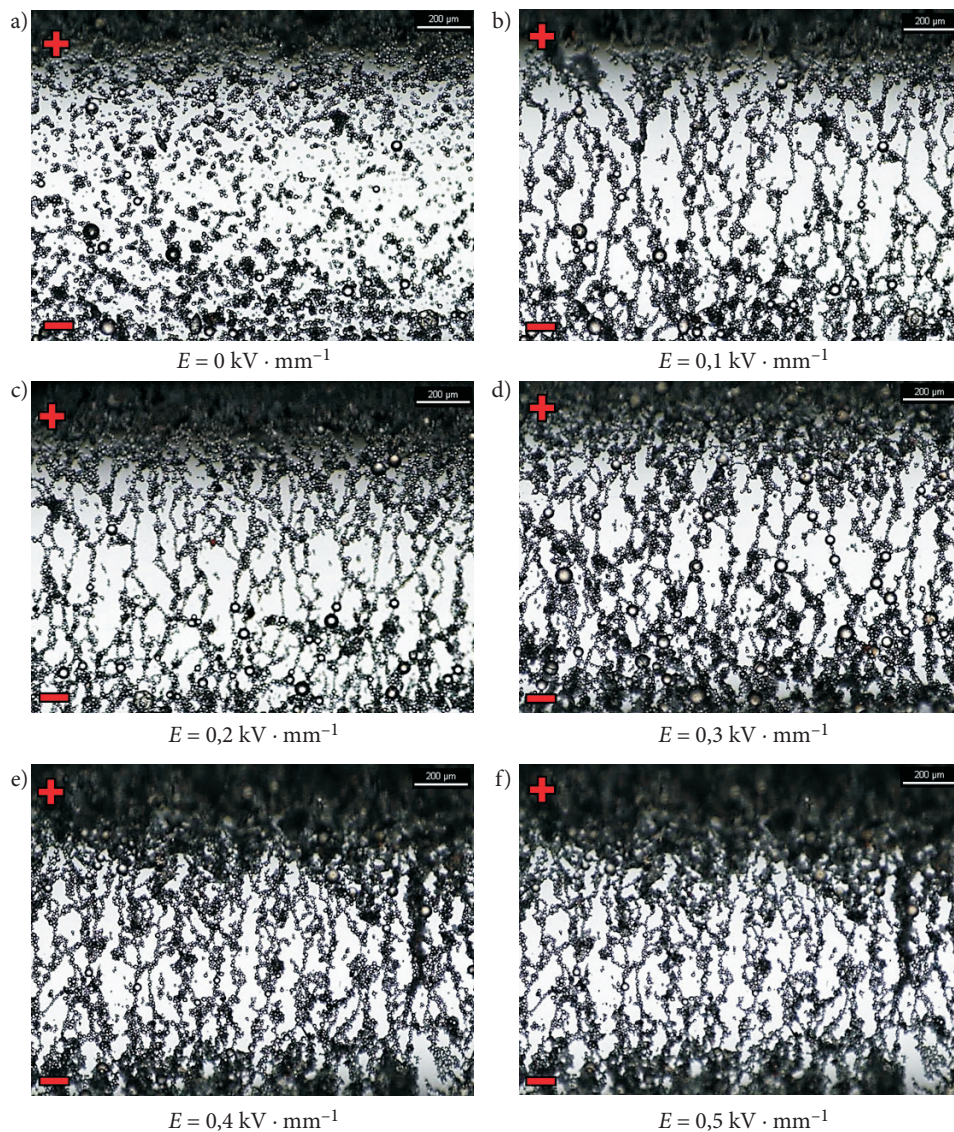
### 3. Wyniki badań mikroskopowych *in situ*

Na początku przeprowadzono obserwacje mikroskopowe komercyjnej cieczy ER LID3354 s [10] poddanej działaniu stałego pola elektrycznego o natężeniu  $E = 0 \div 0,6 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Na rysunku 3 przedstawiono wybrane charakterystyczne sekwencje zdjęć obrazujące zmiany struktury wewnętrznej cieczy ER LID3354 s w miarę wzrostu natężenia stałego pola elektrycznego.

Na przedstawionych na rysunku 3 fotografiach widać wyraźnie kolejne fazy tworzenia się tzw. łańcuchów fibrylowych z cząstek polimerowych obecnych w oleju silikonowym stanowiącym matrycę (bazę) cieczy ER LID3354 s. W początkowej fazie obserwacji (rys. 3a) natężenie pola elektrycznego było równe  $E = 0 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Widoczne były polimerowe cząstki stałe dosyć swobodnie „zawieszane” w cieczy bazowej. Niewielkie skupiska tych cząstek były spowodowane ich wzajemnym oddziaływaniem molekularnym wynikającym z ich bardzo dużej zawartości w oleju bazowym (37,5% v/v [10]). Następnie przy zwiększonym natężeniu pola elektrycznego do wartości  $E = 0,1 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  (rys. 3b) obserwowano powstające w coraz większej liczbie „łańcuchy” tworzące strukturę sieci. Podczas zwiększania natężenia pola elektrycznego do wartości  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  (rys. 3c) tworząca się struktura sieci ulegała zagęszczeniu. Łańcuchy polimerowych cząstek stawały się coraz grubsze,



a sieć coraz gęstsza. W trakcie zwiększenia natężenia pola elektrycznego do wartości  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  i następnie  $E = 0,4 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  i  $E = 0,5 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  utworzona sieć stawała się coraz gęstsza, szczególnie w strefach sąsiadujących z elektrodami (rys. 3e, 3f).



Rys. 3. Widok cieczy ER LID3354 s obserwowanej pod mikroskopem polaryzacyjnym Nikon Eclipse LV 100 D

W trakcie tych badań zwiększono natężenie pola elektrycznego do wartości  $E = 0,6 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , lecz struktura sieci była stabilna i nie ulegała dalszym zmianom. Oznacza to niewątpliwie, że wszystkie obecne w cieczy polimerowe cząstki zostały całkowicie „wykorzystane” do budowy łańcuchów i struktury sieci odpowiedzialnych za efekt ER.

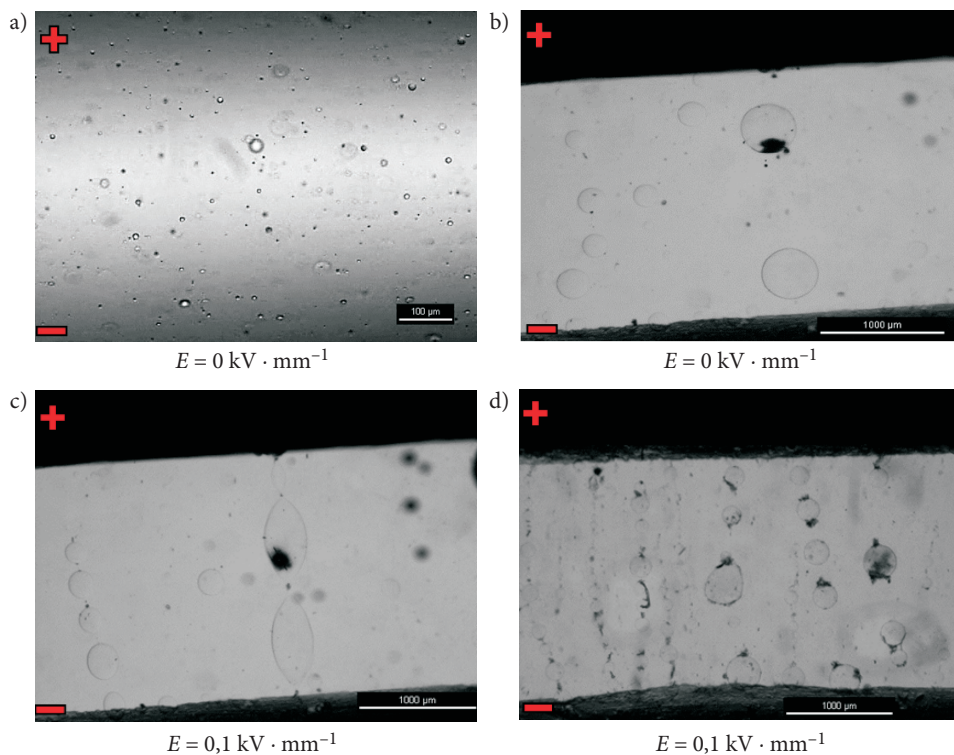
Począwszy od  $E = 0,4 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  struktura sieci była stabilna, nie uległa zmianom niezależnie od czasu obserwacji.

Po odłączeniu zasilania utworzona sieć i łańcuchy rozdzielały się i znów widoczne były „swobodnie zawieszona” pojedyncze nano- i mikrocząstki. W kolejnych próbach (z tą samą porcją cieczy) zwiększano ponownie natężenie pola elektrycznego w zakresie  $E = 0 \div 0,4 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Obserwowano podobne efekty jak w pierwszej próbie. Kilkakrotnie wykonano próby zwiększania oraz zmniejszania natężenia pola elektrycznego  $E$  (również przy zmienianej biegunowości) dla tej samej próbki. W każdej próbie efekty tworzenia oraz zagęszczenia się utworzonej sieci polimerowych cząstek w cieczy ER LID 3354 s były przewidywalne, a schemat ich tworzenia był powtarzalny.

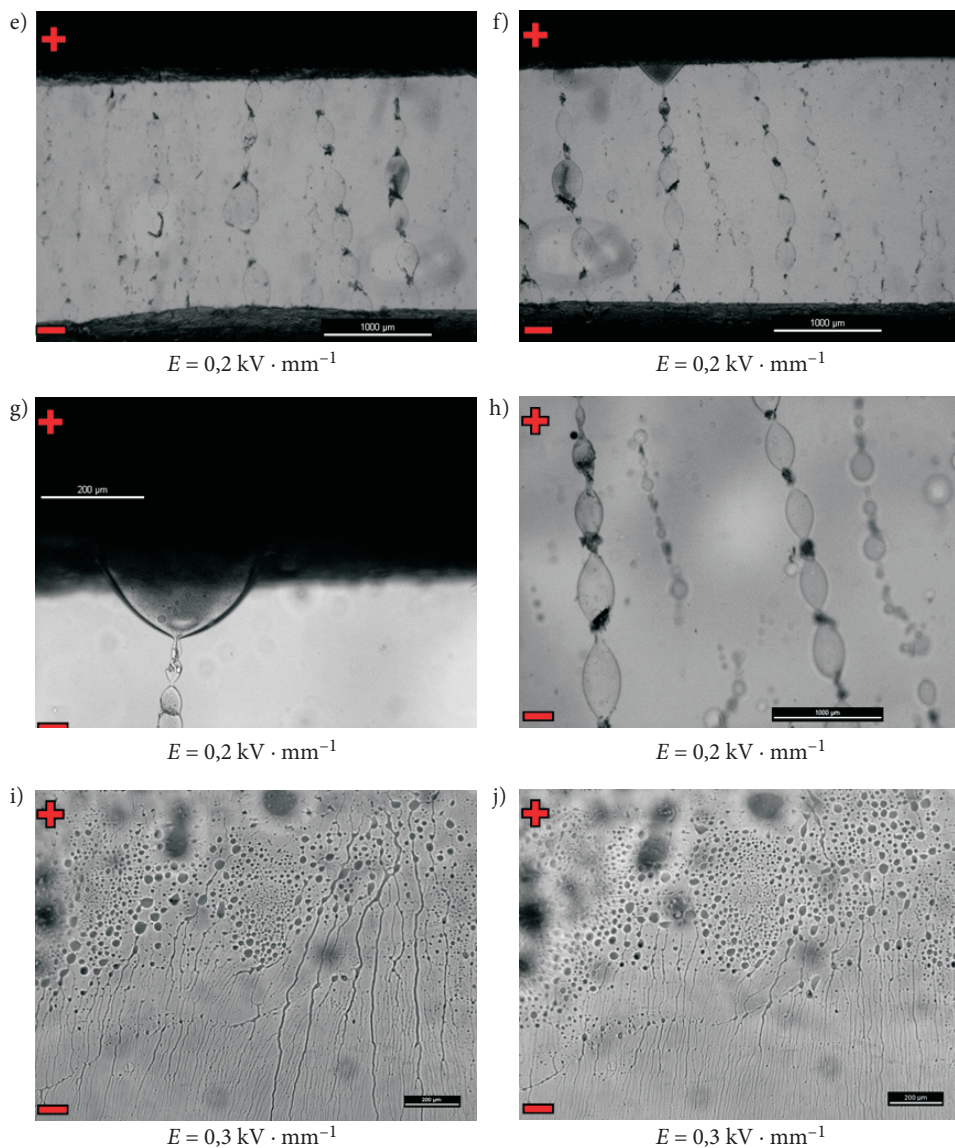
Procedura badania mieszanin zawierających ciecze jonowe była podobna. Na rysunku 4 przedstawiono wybrane charakterystyczne sekwencje zdjęć obrazujące zmiany struktury wewnętrznej mieszaniny ER skomponowanej z bazowego oleju polialfaolefinowego PAO-6 [4] jako matrycy i 2% (v/v) cieczy jonowej CJ 008, tj. triheksyloitetradecylofosfonio bis(trifluorometylosulfonylo)imidu [5], poddanej działaniu zewnętrznego pola elektrycznego o natężeniu  $E = 0 \div 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Tym razem większe natężenie pola elektrycznego było zbędne, ponieważ efekt ER zanikał już przy  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  [1].

Mieszanina PAO-6 + CJ 008 zachowywała się inaczej niż dwufazowa ciecz wzorcowa ER LID3354 s. Z uwagi na to, że obydwie składniki mieszaniny PAO-6 + CJ 008 są przezroczyste, obserwacja zmian procesów w niej zachodzących była bardzo utrudniona w porównaniu z obserwacją cieczy wzorcowej LID3354 s. W związku z tym rejestracja charakterystycznych sekwencji zdjęć również była bardzo skomplikowana i żmudna, z powodu dużej dynamiki zmian w krótkim czasie. Zdołano jednak uchwycić moment tworzenia się „łańcuchów” fibrylowych z cieczy jonowej CJ 008, trochę inaczej niż miało to miejsce w heterogenicznej cieczy wzorcowej. Początkowo, gdy natężenie pola elektrycznego było równe  $E = 0 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  (rys. 4a), obserwowano duże rozproszenie nanocząstek cieczy jonowej CJ 008 w oleju bazowym PAO-6, chociaż sporadycznie występowały również większe cząstki cieczy jonowej CJ 008, świadczące o pewnej niejednorodności dyspersji (rys. 4b). Następnie, przy zwiększonym natężeniu pola elektrycznego do wartości  $E = 0,1 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , zarejestrowano pierwsze objawy powstania „łańcuchów fibrylowych” tworzonych właśnie przez te nieco większe i dzięki temu najbardziej widoczne na pierwszym planie cząstki. Na rysunku 4c pokazano efekt oddziaływania pola elektrycznego o natężeniu

$E = 0,1 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  na pojedyncze cząstki cieczy jonowej CJ 008, które wydłużają się i łączą w łańcuch w kierunku zgodnym z kierunkiem działania tego pola, pomiędzy elektrodami. Na kolejnym zdjęciu (rys. 4d) widać powstawanie kolejnych, nowych „łańcuchów fibrylowych” przy tej samej wartości  $E = 0,1 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Po kolejnym wzroście wartości natężenia pola elektrycznego  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  (rys. 4e i rys. 4f) rośnie liczba „łańcuszków fibrylowych”, kolejne mikrocząstki cieczy jonowej łączą się w łańcuchy pomiędzy elektrodami. Nie widać jednak jeszcze żadnych symptomów tworzenia się zagęszczonej „sieci fibrylowej” — jak to miało miejsce w cieczy wzorcowej LID3354 s. Zaobserwowano natomiast pierwsze pojedyncze objawy gromadzenia się cieczy jonowej przy elektrodzie (rys. 4f i 4g). Na rysunku 4h pokazano strukturę tego samego łańcucha w jego środkowej części. Widoczne na zdjęciach ciemne punkty, szczególnie w miejscach styku poszczególnych cząstek cieczy jonowej w łańcuchu fibrylowym, to prawdopodobnie niezidentyfikowane nanocząstki zanieczyszczeń skupiających się łatwo w obszarze najsilniejszych oddziaływań molekularnych i elektrycznych.







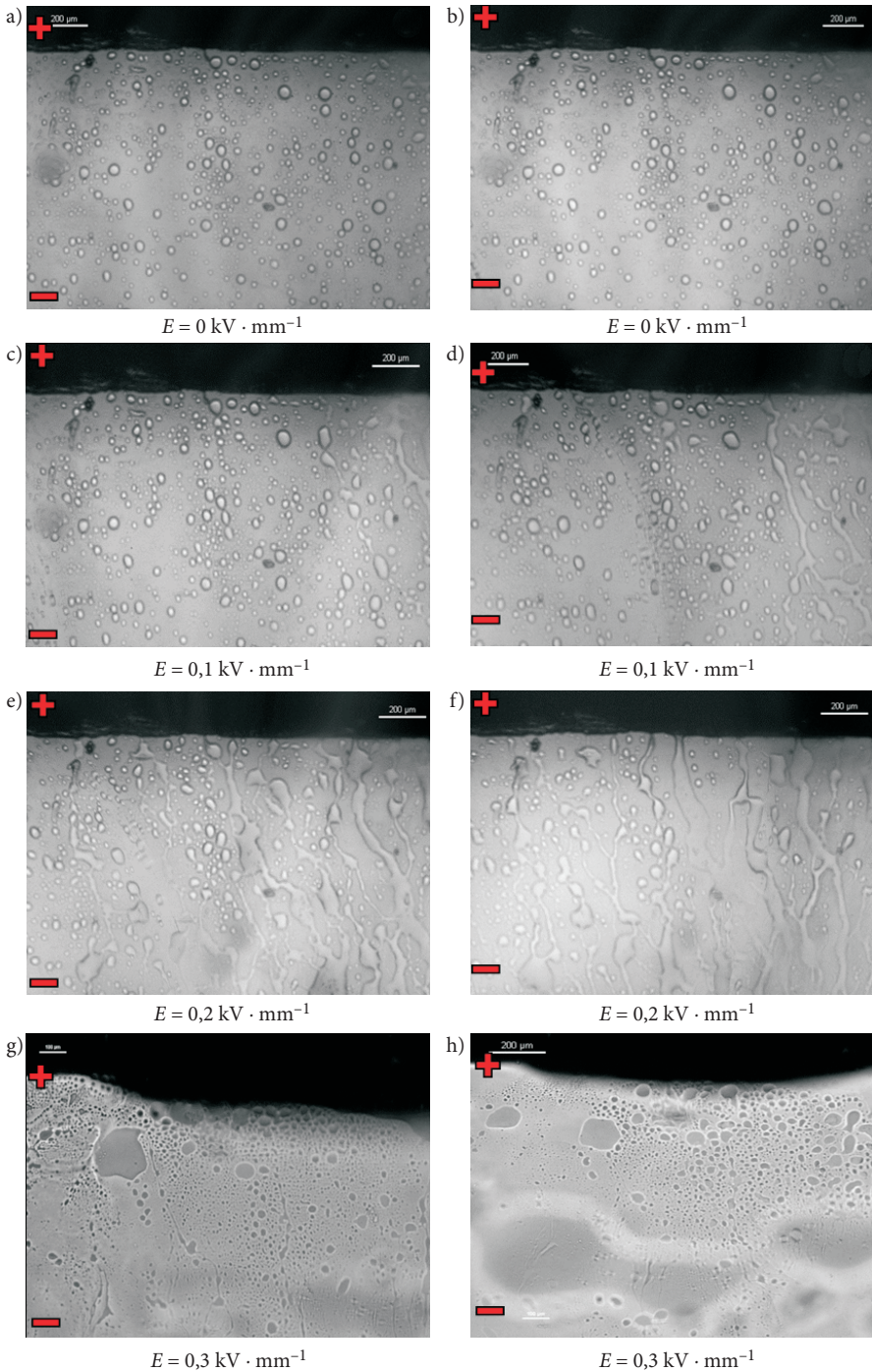
Rys. 4. Widok mieszaniny PAO-6 + CJ 008 obserwowanej pod mikroskopem polaryzacyjnym Nikon Eclipse LV 100 D

Analizując wszystkie zdjęcia obrazujące tzw. „łańcuchy fibrylowe”, można stwierdzić, że są to raczej pojedyncze łańcuchy (nierozgałęzione i niełączące się z innymi łańcuchami) z mikrocząstek połączonych szeregowo jedna z drugą i „rozpartych” pomiędzy elektrodami. Rozmiary mikrocząstek cieczy jonowej są zróżnicowane i przypadkowe — wynikają z uzyskanej dyspersji poszczególnych próbek cieczy

jonowej CJ 008 w mieszaninie z olejem bazowym PAO-6. Dalsze zwiększanie natężenia pola elektrycznego do wartości  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  powodowało stopniową destrukcję powstałych wcześniej „łańcuchów fibrylowych” i tworzenie się skupisk cieczy jonowej w postaci „strumieni” skupiających się przy elektrodzie (rys. 4i oraz 4j). Po odłączeniu zasilania badana mieszanina nie powracała do stanu początkowego przedstawionego na rysunku 4a; obecnie mikrocząstki z rozpadu „łańcuchów fibrylowych” zalegały trwale przy elektrodach (rys. 4j). W kolejnych próbach z tą samą porcją mieszaniny nie rejestrowano żadnych efektów tworzenia jakichkolwiek „łańcuchów fibrylowych”. Kilkukrotne zmiany biegunowości zasilania zewnętrznego stałym polem elektrycznym również nie przynosiły żadnych efektów. Badana mieszanina PAO-6 + CJ 008 uległa destrukcji i ta sama porcja nie wykazywała już żadnego efektu ER, stwierdzonego wcześniej zarówno w badaniach reologicznych za pomocą zmodernizowanego reometru Brookfield DV-III Ultra [1], jak i w badaniach w tzw. spektroskopii dielektrycznej [9]. Jednak ta mieszanina wykazała, w zakresie natężenia pola elektrycznego  $E = 0 \div 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , wielokrotnie większy wzrost lepkości w porównaniu z drugą badaną mieszaniną, tj. GP-1 + CJ 001.

Na rysunku 5 przedstawiono wybrane charakterystyczne sekwencje zdjęć obrazujące zmiany struktury wewnętrznej mieszaniny ER skomponowanej z silikonowej cieczy tłumiącej GP-1 [2] jako matrycy i 2% (v/v) cieczy jonowej CJ 001, tj. tetrafluoroboranu 1-metylo-3-oktyloksymetyloimidazolowego [3]. Tę mieszaninę badano także tylko przy natężeniu pola elektrycznego w zakresie  $E = 0 \div 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , z tego samego powodu co mieszaninę PAO-6 + CJ 008. Jednak w tym przypadku proces tworzenia i zaniku efektu ER był trochę inny i znacznie bardziej dynamiczny. Jego rejestracja wiązała się z jeszcze większymi trudnościami niż w poprzednim przypadku.

Mieszanina GP-1 + CJ 001, podobnie jak mieszanina PAO-6 + CJ 008, jest także przezroczysta, stąd występowały podobne trudności w obserwacji i równoczesnej rejestracji charakterystycznych sekwencji zdjęć. Uzyskana dyspersja cieczy jonowej CJ 001 w oleju silikonowym GP-1 była bardziej równomierna i jednorodna (rys. 5a i 5b) od dyspersji cieczy jonowej CJ 008 w oleju bazowym PAO-6 (rys. 4a i 4b), ale średni rozmiar cząstek był większy. Nie było takiego zróżnicowania średnich rozmiarów cząstek jak poprzednio. W efekcie widoczne zagęszczenie cząstek cieczy jonowej CJ 001 było nieco większe niż cieczy jonowej CJ 008. W początkowej fazie obserwacji, gdy natężenie pola elektrycznego było równe  $E = 0 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , cząstki cieczy jonowej CJ 001 nie zmieniały swojego położenia ani rozmiaru i struktury. Następnie zasilono obserwowaną próbkę natężeniem pola elektrycznego o wartości  $E = 0,1 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . W początkowej fazie pojawiły się pojedyncze, krótkie łańcuchy, na bardzo krótkich odcinkach, ustawione zgodnie z kierunkiem działania pola elektrycznego, które następnie łączyły się, tworząc jakby strugę cieczy jonowej w oleju bazowym, spełniającą funkcję „łańcucha fibrylowego” (rys. 5c i 5d). W kolejnej fazie, po zwiększeniu natężenia pola elektrycznego do wartości  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , następowało tworzenie kolejnych strumieni cieczy jonowej (rys. 5e i rys. 5f).



Rys. 5. Widok mieszanki GP1 + CJ 001 obserwowanej pod mikroskopem polaryzacyjnym Nikon Eclipse LV 100 D



Po zwiększeniu natężenia pola elektrycznego do wartości  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  dochodziło do rozrywania łańcuchów i gromadzenia się cieczy jonowej przy elektrodzie (rys. 5g i 5h). Po odłączeniu zasilania badana mieszanina nie powracała do stanu początkowego przedstawionego na rysunku 5a. Mikrocząstki z rozpadu „strumieni (łańcuchów) fibrylowych” zalegały trwale przy elektrodach, tworząc widoczną na rysunkach 5g i 5h warstwę. Na rysunku 5g widać fazę rozpadu strumieni i gromadzenie się cieczy jonowej przy elektrodzie. Na rysunku 5h zarejestrowano większe skupiska cieczy jonowej zalegającej w niewielkiej odległości od elektrody. W kolejnych próbach z tą samą porcją mieszaniny GP-1 + CJ 001 nie zarejestrowano żadnego efektu ER. Kilkakrotne zmiany biegunowości zasilania zewnętrznym stałym polem elektrycznym również nie przyniosły żadnych efektów. Badana mieszanina GP-1 + CJ 001 uległa destrukcji i ta sama jej porcja nie wykazywała już żadnego efektu ER, stwierdzonego wcześniej w badaniach za pomocą reometru Brookfield DV-III Ultra przystosowanego do oceny efektu ER [1], a także w spektroskopii dielektrycznej [9].

#### 4. Podsumowanie i wnioski końcowe

Przeprowadzone badania mikroskopowe *in situ* mechanizmu efektu ER w dwóch mieszaninach olejów mineralnych z wybranymi cieczami jonowymi, poddanych działaniu zewnętrznego stałego pola elektrycznego, pozwoliły na jednoznaczne rozpoznanie przebiegu tego mechanizmu, potwierdzenie jego zaistnienia i zarejestrowanie objawów zmian struktury wewnętrznej badanych mieszanin, prowadzących do zaniku efektu ER. Obydwie mieszaniny poddane działaniu zewnętrznego pola elektrycznego generowały efekt ER z powodu powstania „łańcuchów lub strumieni fibrylowych”, które funkcjonowały do natężenia pola elektrycznego równego  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Po przekroczeniu tej wartości, przy  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , „łańcuchy lub strumienie fibrylowe” rozpadały się i cząstki cieczy jonowych zawartych w tych mieszaninach (2% v/v) gromadziły się przy elektrodach. Mieszaniny ulegały destrukcji i już nie były zdolne do ponownego wygenerowania efektu ER. Jednak przebieg powstawania i zaniku efektu ER w obu mieszaninach był odmienny. Mianowicie w mieszaninie PAO-6 + CJ 008, która uzyskiwała dwudziestokrotny przyrost lepkości przy działaniu natężenia pola elektrycznego o wartości  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  [1], powstawały autentyczne „łańcuchy fibrylowe” z cząstek cieczy jonowej CJ 008, rozpostarte pomiędzy elektrodami, których liczba rosła wraz ze zwiększeniem wartości natężenia pola elektrycznego (rys. 4d, 4e, 4f) i które ulegały degradacji przy  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , przy czym ich zanik i gromadzenie cząstek cieczy jonowej przy elektrodach powodowały powstanie tam dość luźnej warstwy o większym stężeniu cieczy jonowej niż w pozostałej objętości mieszaniny (rys. 4i oraz 4j).



Charakterystyka reologiczna mieszaniny PAO-6 + CJ 008 przy braku zewnętrznego pola elektrycznego opisana była równaniem Newtona ( $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$ ), natomiast w obecności zewnętrznego pola elektrycznego, do wartości  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , została opisana równaniem Ostwalda-de Waele'a ( $\tau = m_2 \dot{\gamma}^{n_2}$ ) przy wykładniku  $n_2 < 1$  typowym dla lepkiej cieczy pseudoplastycznej. W takim przypadku następuje potęgowy przyrost naprężeń ścinających ( $\tau$ ) w funkcji prędkości ścinania  $\dot{\gamma}$  [1]. Jednak przyłożenie pola elektrycznego o natężeniu  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , w efekcie wyżej opisanej degradacji „łańcuchów fibrylowych” cieczy jonowej, spowodowało powrót do niemal takich samych wartości lepkości jak przy braku działania zewnętrznego pola elektrycznego. Charakterystyka reologiczna mieszaniny PAO-6 + CJ 008 znów odpowiadała równaniu Newtona, choć tym razem współczynnik kierunkowy prostej (tzn. tangens kąta nachylenia prostej:  $\tau = \eta_p \cdot \dot{\gamma}$ ) był nieco większy [1]. Ponadto trzeba przypomnieć, że na przyrost potęgowy naprężeń ścinających mieszaniny PAO-6 + CJ 008 poddanej działaniu natężenia pola elektrycznego o wartości  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  i uzyskanie prawie trzykrotnie większej maksymalnej wartości lepkości mieszaniny PAO-6 + CJ 008 ( $\eta = 1247,19 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ) od mieszaniny GP-1 + CJ 001 ( $435,71 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ) miała również wpływ większa lepkość cieczy bazowej PAO-6 ( $\eta = 47,36 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ) od GP-1 ( $\eta = 12,61 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ) [1] oraz pewne zmiany właściwości dielektrycznych mieszaniny PAO-6 + CJ 008 polegające na chwilowym zwiększaniu wartości ( $\epsilon$ ) mimo zwiększania napięcia ( $U$ ) co, w przeciwieństwie do mieszaniny GP-1 + CJ 001, oznaczało nieco mniejszą dynamikę procesu degradacji i lepsze właściwości ER [1, 9].

Mieszanina GP-1 + CJ 001 przy działaniu natężenia pola elektrycznego  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  uzyskała tylko trzykrotny przyrost lepkości [1]. W tej mieszaninie nie obserwowano typowych „łańcuchów fibrylowych” przy działaniu zewnętrznego pola elektrycznego. Zauważalne były tylko krótkie pojedyncze grupy cząstek cieczy jonowej CJ 001. Cząstki te były stosunkowo jednorodne, jeśli chodzi o rozmiar, ale ich rozmiar średni był nieco większy od nanocząstek cieczy jonowej CJ 008 w poprzedniej mieszaninie. Stąd widoczne zagęszczenie cząstek cieczy jonowej CJ 001 w oleju GP-1 było znaczne (rys. 5a, rys. 5b). W zasadzie łączyły się ze sobą tylko te cząstki, które były bardzo blisko siebie (w zasięgu oddziaływań molekularnych cząstek cieczy jonowej). Następnie te grupy cząstek łączyły się ze sobą, tworząc jakby strugę cieczy jonowej „zmierzającą” ku elektrodzie, spełniającą funkcję „łańcucha fibrylowego” (rys. 5c, 5d). Liczba tych strumieni rosła po zwiększeniu natężenia do  $E = 0,2 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$  (rys. 5e, 5f) i następnie natychmiast ulegały one degradacji (przy  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ), a cząstki cieczy jonowej CJ 001 gromadziły się przy elektrodach (rys. 5g, 5h), tworząc tam dość zwartą trwałą warstwę i zalegające tuż pod nią „większe” skupiska cieczy jonowej.

Charakterystyka reologiczna mieszaniny GP-1 + CJ 001 przy braku zewnętrznego pola elektrycznego opisana była równaniem Bingham'a ( $\tau = \tau_0 + \eta_p \cdot \dot{\gamma}$ ) [1]. Wydaje się, że wygenerowanie niewielkiej wartości granicznych naprężeń ścinających  $\tau_0$  jest spowodowane dużym zagęszczeniem jednorodnych cząstek cieczy

jonowej CJ 001 — rys. 5a, 5b (co samo w sobie jest przyczyną zwiększania lepkości mieszaniny) oraz bardzo dużym zróżnicowaniem lepkości obu składników mieszaniny GP-1 + CJ 001 [1]. Mianowicie lepkość cieczy izolującej GP-1 wynosiła  $\eta = 12,61$  mPa·s, a lepkość dodanej cieczy jonowej  $\eta = 552,42$  mPa·s. W obecności zewnętrznego pola elektrycznego, do wartości  $E = 0,2$  kV · mm<sup>-1</sup>, charakterystyka reologiczna tej mieszaniny była opisana równaniem Herschela-Bulkeya ( $\tau = m_1 \cdot \dot{\gamma}^{n_1} + \tau_0$  przy  $n_1 < 1$ ), typowym dla lepkoplastycznej cieczy pseudoplastycznej. Po zwiększeniu wartości natężenia pola elektrycznego do wartości  $E = 0,3$  kV · mm<sup>-1</sup> lepkość mieszaniny GP-1 + CJ 001 była niemal taka sama jak wówczas, gdy wartość natężenia pola elektrycznego wynosiła  $E = 0$ . Charakterystyka reologiczna tej mieszaniny mogła być znów opisana równaniem Bingham [1].

Należy jednak w tym miejscu przypomnieć, że pomiary właściwości ER tych mieszanin zmodernizowanym wiskozymetrem Brookfield DV-III Ultra były realizowane przy możliwie najmniejszej prędkości ścinania: w przypadku mieszaniny GP-1 + CJ001  $\dot{\gamma}_{\min} = 4,20$  s<sup>-1</sup>, a w przypadku mieszaniny PAO-6 + CJ 008  $\dot{\gamma}_{\min} = 2,67$  s<sup>-1</sup>. Uzyskanie jeszcze mniejszych prędkości ścinania, przy zdeterminowanym doborze zestawów „wrzeciono/cylinder”, nie było możliwe [1]. Zatem rzeczywisty przebieg charakterystyki reologicznej  $\tau = f(\dot{\gamma})$  dla mniejszych wartości prędkości ścinania jest praktycznie nieokreślony.

Reasumując, na podstawie tych obszernych, wieloaspektowych badań właściwości ER za pomocą zmodernizowanego wiskozymetru Brookfield DV-III Ultra [1], badań w spektroskopii dielektrycznej [9] i mikroskopowych badań mechanizmu efektu ER można wnioskować, że:

- 1) możliwe jest wytworzenie mieszanin olejów węglowodorowych z niewielką ilością cieczy jonowej (do 2% v/v), generujących efekt ER pod wpływem działania zewnętrznego stałego pola elektrycznego, ale ze względu na znaczną konduktywność cieczy jonowych ich większa ilość w mieszaninach prowadzi do elektrycznego zwarcia [1];
- 2) wobec ogromnych trudności z uzyskaniem roztworu cieczy jonowych w oleju węglowodorowym niezwykle ważne jest wytworzenie mieszaniny o maksymalnym rozdrobieniu i rozproszeniu cieczy jonowej w oleju bazowym, w celu uzyskania cieczy quasi-homogenicznej; w badaniach [1] taki stan wykazała mieszanina PAO-6 + CJ 008, której charakterystyka  $\tau = f(\dot{\gamma})$  dla  $E = 0$  była newtonowska, a dla  $E < 0,3$  kV · mm<sup>-1</sup> potęgowa Ostwalda-de Waele'a;
- 3) podstawowym mechanizmem odpowiedzialnym za efekt ER mieszanin olejów węglowodorowych z niewielką ilością cieczy jonowej, poddanych działaniu zewnętrznego stałego pola elektrycznego, jest powstawanie „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych” z mikro-/nanocząstek cieczy jonowej, rozpostartych pomiędzy elektrodami wzdłuż linii działania pola elektrycznego;

- 4) działające pole elektryczne po osiągnięciu pewnej wartości progowej (tutaj  $E = 0,3 \text{ kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) doprowadza do trwałej destrukcji „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych” i zaniku efektu ER oraz do gromadzenia się cząstek cieczy jonowej przy elektrodach;
- 5) na przebieg charakterystyki  $\tau = f(\dot{\gamma})$  mieszaniny oleju węglowodorowego z niewielką ilością cieczy jonowej, poddanej działaniu zewnętrznego stałego pola elektrycznego, mają wpływ przede wszystkim tzw. właściwości dielektryczne składnika czynnego elektrycznie, a właściwie ich zmiana w funkcji przyłożonego napięcia BIAS-u (DC); w badaniach [9] stwierdzono, że ciecz jonowa CJ 008, której przenikalność elektryczna zmieniała się powoli ( $U = 0 \text{ V}$ ,  $\epsilon = 1027$ ;  $U = 10 \text{ V}$ ,  $\epsilon = 841$ ;  $U = 20 \text{ V}$ ,  $\epsilon = 354$ ), pozwoliła na wygenerowanie wielokrotnie lepszego efektu ER niż ciecz jonowa CJ 001, której stała dielektryczna malała gwałtownie ( $U = 0 \text{ V}$ ,  $\epsilon = 1035$ ;  $U = 10 \text{ V}$ ,  $\epsilon = 2,29$ ;  $U = 20 \text{ V}$ ,  $\epsilon = 0,34$ );
- 6) wydaje się, że charakterystyki elektreologiczne  $\tau = f(\dot{\gamma})$  oznaczanych mieszanin zależą także od wielu właściwości fizykochemicznych ich składników oraz od zróżnicowania ich wartości, m.in. od różnicy lepkości oleju bazowego izolującego i dodanej cieczy jonowej, np. dla mniejszej różnicy lepkości (PAO-6 i CJ 008) charakterystyka  $\tau = f(\dot{\gamma})$  przy  $E = 0$  była newtonowska, a dla dwa razy większej różnicy lepkości (GP-1 i CJ 001) charakterystyka  $\tau = f(\dot{\gamma})$  była binghamowska;
- 7) natomiast na uzyskiwanie maksymalnych wartości ( $\tau_{max}$ ) i ( $\eta_{max}$ ), gdy  $E > 0$ , mogła mieć wpływ, obok wcześniej podanych aspektów dielektrycznych, również kilkukrotnie większa lepkość oleju bazowego ( $\eta_{PAO-6} \gg \eta_{GP-1}$ ) co mogło przyczynić się do stwierdzonej wolniejszej degradacji „łańcuchów i/lub strumieni fibrylowych”.

Ponadto wydaje się, że na takie zróżnicowanie charakterystyki elektreologicznej mieszaniny GP-1 + CJ 001, w stosunku do charakterystyki mieszaniny PAO-6 + CJ 008, mogła mieć również wpływ znaczna różnica wartości napięcia powierzchniowego. We wcześniejszych badaniach [11, 12] stwierdzono, że w temperaturze 25°C napięcie powierzchniowe oleju bazowego GP-1 wynosiło  $19,547 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ , a cieczy jonowej CJ 001 —  $26,032 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ , gdy w drugiej mieszaninie napięcie powierzchniowe obu składników było prawie takie samo, tj. dla PAO-6 wynosiło  $27,523 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ , a dla CJ 008 —  $28,099 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$  [11, 12]. W tych samych badaniach wykazano również, że właściwości tribologiczne omawianych cieczy jonowych są wyjątkowo dobre. Ocenione parametry smarnościowe tych cieczy jonowych były znacznie lepsze nie tylko od olejów bazowych, lecz także od markowych olejów silnikowych i przekładniowych. Zresztą informacje dotyczące bardzo dobrych właściwości tribologicznych różnych cieczy jonowych są dość powszechne w światowej literaturze tribologicznej [15]. Zatem zaobserwowany efekt gromadzenia się cieczy jonowej przy elektrodach, po destrukcji „łańcuchów fibrylowych” pod wpływem działania zewnętrznego stałego pola elektrycznego, może mieć pozytywny wpływ na konstituowanie odpornego smarującego filmu granicznego.

Przeprowadzone badania i analizy wykazały, że problem zastosowania cieczy jonowej jako składnika aktywnego elektrycznie w mieszaninie ER jest bardzo złożony i napotyka na duże trudności nie tylko z powodu jej złej mieszalności z większością węglowodorowych cieczy hydraulicznych i olejów smarnych, ale przede wszystkim ze względu na jej dużą konduktywność. Nie wystarczy jednak podjąć próby wykorzystania dobranych cieczy jonowych o stosunkowo małej konduktywności. Jak wykazały przeprowadzone badania, konieczna jest także szczegółowa analiza przebiegu charakterystyki ich przenikalności elektrycznej ( $\epsilon$ ) w funkcji częstotliwości ( $f$ ) dla różnych wartości napięcia ( $U$ ) pola BIAS-u (DC). Zmienność ( $\epsilon$ ) w funkcji ( $U$ ) powinna być jak najmniejsza.

Zatem nadal istnieje potrzeba wytworzenia i badania w pełni homogenicznych cieczy ER, tzn. takich, w których składnik aktywny elektrycznie i bazowy olej izolujący stanowią roztwór. Wówczas wymieszanie obu składników dotyczy skali molekularnej, a wtedy rozróżnienie wzrokowe składników takiej cieczy jest praktycznie niemożliwe, nawet pod mikroskopem. Skutki oddziaływania zewnętrznego pola elektrycznego na taką homogeniczną mieszaninę, tj. na molekuly i jony ich składników, są praktycznie nieznanne. Z dotychczasowych informacji literaturowych wynika, że tylko Japończycy zdołali osiągnąć pojedynczy sukces, wytwarzając i badając homogeniczną ciecz ER złożoną z polimerowych ciekłych kryształków, np. [13], jednak wzrosty lepkości takiej cieczy w polu elektrycznym nie były imponujące. Wśród cieczy jonowych są też takie, które przy odpowiednio długim łańcuchu alkielowym i w pewnym zakresie temperatur osiągają strukturę ciekłokrystaliczną [14]. Podjęcie prób z takimi cieczami jonowymi, o odpowiednio dobranych właściwościach reologicznych i dielektrycznych oraz umożliwiającymi wytworzenie w pełni homogenicznej mieszaniny z olejem bazowym, to kolejne interesujące wyzwanie. Ze względu na dużą różnorodność cieczy jonowych oraz ich specyficzne i unikatowe właściwości należy prowadzić dalsze szeroko zakrojone badania możliwości ich wykorzystania zarówno w aspekcie elektroeologicznym, jak i tribologicznym.

Źródło finansowania pracy — działalność statutowa Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.08.2020 r. Zatwierdzono do publikacji 16.09.2020.

Tadeusz Kałdoński <https://orcid.org/0000-0001-6483-3739>

Krzysztof Gocman <https://orcid.org/0000-0002-6515-7178>

Tomasz Jan Kałdoński <https://orcid.org/0000-0002-3780-7604>

#### LITERATURA

- [1] JUDA J., KAŁDOŃSKI T.J., KAŁDOŃSKI T., *Eksperymentalne badania elektroeologicznych właściwości olejów smarnych zawierających ciecz jonową. Cz. 1. Badania zmodyfikowanym wiskozymetrem Brookfield DV-III Ultra*, Biuletyn WAT, 68, 3, 2019, 35-63, DOI: 10.5604/01.3001.0013.5554.
- [2] Norma Obronna NO-91-A266, *Materiały pędne i smary. Silikonowa ciecz tłumiąca klasy lepkościowej 350 mm<sup>2</sup>/s*, Kod MPS S-9773, 2014.



- [3] Materiały Chemical Reagents, J.S.C.POCH, Gliwice, Polska.
- [4] Karta Informacyjna. Product Data Sheet-SSPLUS Polyalphaolefins (PAO). Exxon Mobil Chemical, 150024, 2007.
- [5] Materiały Sigma-Aldrich, [www.sigma-aldrich.com](http://www.sigma-aldrich.com) [dostęp: 09.2020].
- [6] JUDA J., MADEJA J., OLSZAK A., KĘSY Z., KAŁDOŃSKI T., *Problematyka badania właściwości cieczy elektoreologicznych*, XXV Konferencja Naukowa nt. „Problemy rozwoju maszyn roboczych”, Zakopane, 22-25 stycznia 2012 r.
- [7] JUDA J., MADEJA J., OLCZAK A., KĘSY Z., KAŁDOŃSKI T., *Badania właściwości cieczy elektoreologicznych*, *Hydraulika i Pneumatyka*, 2, 2012, s. 5.
- [8] JUDA J., KAŁDOŃSKI T.J., KĘSY Z., KĘSY A., *Zestaw badawczy*, Zgłoszenie patentowe nr W 124200 z 25.06.2015 r. (Decyzja UPRP o przyznaniu Prawa ochronnego 10 lutego 2017 r.).
- [9] JUDA J., KAŁDOŃSKI T., KAŁDOŃSKI T.J., MRUKIEWICZ M., *Eksperymentalne badania elektoreologicznych właściwości olejów smarnych zawierających ciecz jonową. Cz. 2. Badania w spektroskopii dielektrycznej*, *Biuletyn WAT*, 69, 2, 2020, 43-69, DOI: 10.5604/01.3001.0014.5635.
- [10] Lord Material Division, [www.smarttec.co.uk](http://www.smarttec.co.uk) [dostęp: 09. 2020].
- [11] KAŁDOŃSKI T.J., *Badania i ocena alkoksymetyloimidazolowych cieczy jonowych jako nowych smarów stalowych węzłów tribologicznych*, rozprawa doktorska WAT, Warszawa 2012.
- [12] KAŁDOŃSKI T. (red.), *Porowate łożyska ślizgowe nowej generacji — badania i prognozy*, WAT, Warszawa, 2013.
- [13] NAKAMURA T., SAGA N., NAKAZAWA M., *Variable Viscous Control of a Homogenous ER Fluid Device Considering its Dynamic Characteristics*, *Mechatronics*, 14, 2004, pp. 55-68.
- [14] HOLBREY J.D., ROGERS R.D., *Physicochemical Properties of Ionic Liquids: Melting Points and Phase Diagrams*, Ch. 3.1. pp. 57-72 in book: *Ionic Liquids in Synthesis*, Second Edition. Wassercheid P. and Welton T. (Eds.), 2008, WILEY-VCH Verlags GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- [15] KAŁDOŃSKI T.J., *Ciecze jonowe — perspektywiczne oleje smarujące*, WAT, Warszawa, 2014.

J. JUDA, T. KAŁDOŃSKI, K. GOCMAN, T.J. KAŁDOŃSKI, C. PAKOWSKI

### Experimental studies of electrorheological properties of lubricating oils containing ionic liquid. Part 3. Microscopic examination of the ER effect mechanism

**Abstract.** The article presents the results of in situ microscopic observations of quasihomogenic mixtures of hydrocarbon oils containing ionic liquids. Observations were made using NIKON ECLIPSE LV 100 D optical microscope. The mechanism of generating the ER effect in two mixtures was observed, i.e., in silicone damping liquid GP-1, which is polymethylsiloksane mixture containing 2% (v/v) of ionic liquid CJ 001, i.e., tetrafluoroboran 1-methyl-3-octyloxymethylimidazolium and base polialfaolefine oil PAO-6 which containing 2% (v/v) of ionic liquid CJ 008, i.e., trihexyltertracylfosfonium bis(trifluoromethylsulfonyl) imide as well as in the two-component standard liquid LID3354s. The observations carried out showed that the prepared mixtures had generated the ER effect. At the threshold value  $E = 0.3 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ , the ER effect disappeared. Photographs, presented in the paper, show changes in the structure of mixtures containing ionic liquids that occur under the influence of an external electric field, consisting in the formation of „fibril chains and/or fibril streams” and then, their destruction and accumulation of ionic liquid particles at the electrodes..

**Keywords:** electrorheological effect (ER), lubricating oils, ionic liquids, microscopy

**DOI:** 10.5604/01.3001.0014.8872

