

doi:10.15199/48.2018.10.41

Właściwości elektretów wytwarzanych metodą wyładowania koronowego

Streszczenie. Celem pracy było badanie parametrów elektretów wykonanych z folii politetrafluoroetylenowej (PTFE), po uformowaniu ich metodą wyładowania koronowego w układzie powietrznej triody. Wykonano badania napięcia zastępczego elektretów i rozkładu ładunku elektrycznego na ich powierzchni. Oszacowano energię aktywacji i czas życia ładunku. Stwierdzono, że formowanie elektretów w podwyższonej temperaturze i powolne ich chłodzenie zapewnia dużą stabilność zgromadzonego ładunku.

Abstract. The aim of the work was to study the parameters of electrets made of polytetrafluoroethylene (PTFE) foil, before subjecting them to the electrification of the corona discharge in an air triode system. Study of the equivalent voltage of electrets and distribution of the electric charge on the surface was carried out. Activation energy and lifetime of electrets were estimated. It was found that forming the electrets at elevated temperatures and slowly cooling them ensures a high stability of the accumulated charge. (**Properties of electrets produced by corona discharge.**)

Słowa kluczowe: politetrafluoroetylen, elektret, czas życia, energia aktywacji.

Keywords: polytetrafluoroethylene, electret, life time, activation energy.

Wstęp

Od drugiej połowy ubiegłego wieku wyładowanie koronowe było szeroko stosowane do formowania elektretów z folii polimerowych [1]. Elektryzacja próbek metodą wyładowania koronowego wykorzystuje wyładowanie w powietrzu pomiędzy dwiema niesymetrycznymi elektrodami. Jeżeli próbkę wykonaną z dielektryka wprowadzimy w obszar wyładowań koronowych w układzie ostrze-płyta, nastąpi jej elektryzacja ładunkiem zgodnym, co do znaku, z polaryzacją elektrody ulotowej.

Układy dedykowane do formowania folii polimerowych metodą ulotu mogą zawierać dwie lub trzy elektrody [1, 2, 3]. W układzie dwuelektrodowym – jedna w postaci ostrza, a druga w postaci płyty. W układzie trójelektrodowym – dodatkowo siatka. Zastosowanie układu trójelektrodowego do formowania wyraźnie wpływa na powtarzalność parametrów elektrostatycznych wykonanych elektretów. Rozwiązanie konstrukcyjne stanowiska do elektryzacji, zawierające układ trójelektrodowy, pozwala formować elektrety przy stałym prądzie ulotu I_k i wybranym napięciu siatki U_s . Wielkość napięcia przyłożonego do siatki ma wpływ na wartość napięcia zastępczego U_z uformowanego elektretu.

Podstawowymi zaletami metody z wykorzystaniem wyładowania koronowego jest prosty proces technologiczny pozwalający na wytwarzanie elektretów w temperaturze otoczenia lub w temperaturach podwyższonych.

W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu parametrów procesu formowania na właściwości elektretów wytwarzanych z folii PTFE o grubości 0,5 mm.

Układ pomiarowy

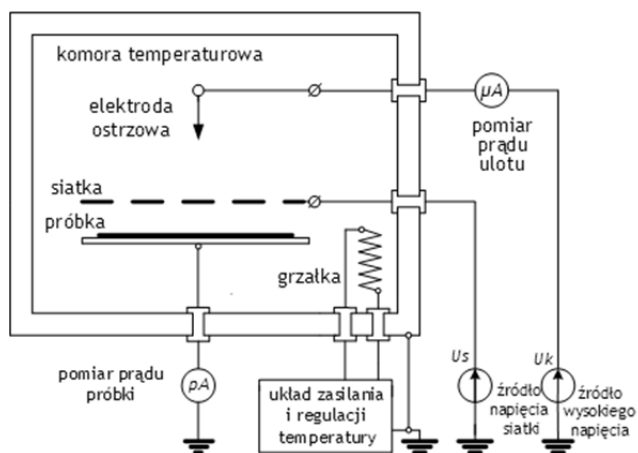
Schemat stanowiska do formowania elektretów w temperaturze pokojowej i w temperaturach podwyższonych pokazano na rysunku 1, a jego rozwiązanie konstrukcyjne przedstawiono na rysunku 2. Rozwiązanie konstrukcyjne zawiera: zespół elektrod ulotowych umieszczonych w górnej części stanowiska, metalową siatkę wspartą na ceramicznym pierścieniu dociskającym oraz dolną, przewodzącą elektrodę trwale zamocowaną i galwanicznie odseparowaną od pozostałych przewodzących części stanowiska.

Elektrodę ulotową wykonano jako zespół siedmiu igieł o długości 12 mm i promieniu ostrza ok. 50 μm . Igły (sześć) rozmieszczono na obwodzie okręgu o średnicy 30 mm, a pojedynczą siódmą igłą – centralnie w środku okręgu.

Zespół elektrod ulotowych znajdował się w odległości 47 mm od umieszczonego w stanowisku elektretu. Trzecią elektrodę stanowiska – siatkę, zamocowano trwale w odległości 10 mm nad próbką.

Jednostronnie metalizowaną próbkę, przeznaczoną do formowania, umieszczano pod siatką na dolnej, uziemionej przez pikoamperomierz, elektrodzie. Próbkę dociskano do uziemionej elektrody pierścieniem ceramicznym.

Przyjęto następujące warunki formowania: napięcie ulotu $U_k = +13$ kV, prąd ulotu $I_k = 5$ μA , napięcie siatki ustalono $U_s = +1400$ V.



Rys.1. Stanowisko do formowania elektretów metodą powietrznej triody

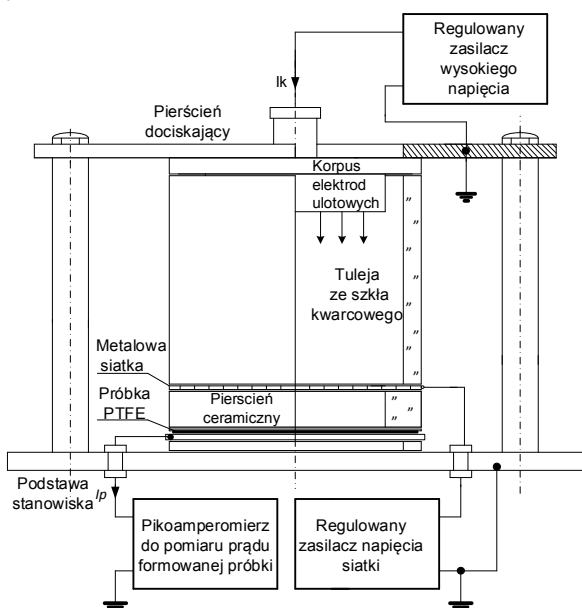
Formowanie rozpoczynano włączeniem napięcia zasilania siatki, a następnie napięcia ulotu koronowego. Od momentu włączenia napięcia ulotu, podobnie jak w [4, 5], realizowano pomiar prądu płynącego przez próbkę I_p .

Całą konstrukcję stanowiska do elektryzacji umieszczono w komorze temperaturowej. Komorę ogrzewano grzałką o mocy 500 W. Do kontroli temperatury wewnątrz komory zastosowano seryjnie produkowany rezystor PT 100. Rezystor umieszczono bezpośrednio pod próbką, w wywierconym w dolnej elektrodzie stanowiska, otworze. Rozwiązanie takie pozwoliło na ciągłą kontrolę temperatury w procesie formowania. Zmiany temperatury w komorze pomiarowej, (w tym próbki) sterowane były za pomocą programowalnego regulatora temperatury.

Rozwiązanie takie pozwoliło na formowanie elektretów w temperaturze otoczenia oraz w temperaturach 100°C, 150°C oraz 315°C.

W stanowisku elektryzowano próbki z folii politetrafluoroetylenowej (PTFE) o średnicy 55 mm i grubości 0,5 mm. Przed procesem formowania były one deelektryzowane w 2-Propanolu. Formowanie próbek rozpoczynano po ich wygrzewaniu w temperaturze formowania. Proces formowania kończono w momencie schłodzenia próbek do temperatury pokojowej.

Konstrukcja komory pozwoliła na nieprzerwaną kontrolę parametrów procesu formowania, t.j. prądu ulotu I_k oraz prądu płynącego przez próbkę I_p . Pomiaru realizowano w trakcie trwania procesu. Wartości napięcia siatki i napięcia ulotu utrzymywano na stałym poziomie w czasie całego procesu. Wszystkie próbki elektryzowano przy stałym prądzie ulotu I_k .



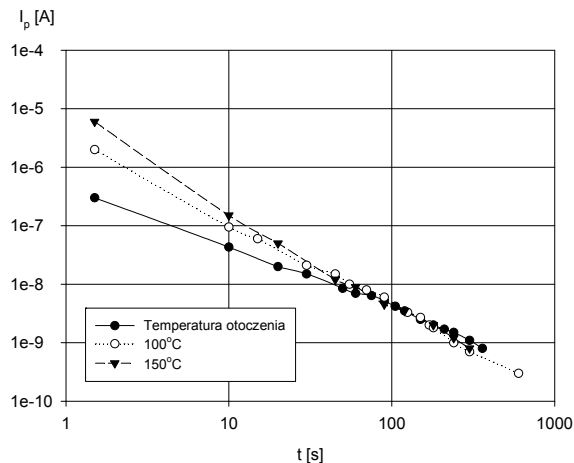
Rys.2. Konstrukcja stanowiska do formowania elektretów metodą powietrznej triody

Wyniki pomiarów

Wyniki badań prądu I_p płynącego pomiędzy elektrodą ulotową a elektrodą uziemioną, na której umieszczono próbkę, dla trzech różnych temperatur formowania, przedstawiono na rysunku 3. Widoczne jest wyraźne różny nachylenie charakterystyk dla próbek formowanych w temperaturze otoczenia w porównaniu z próbkami formowanymi w temperaturach 100°C i 150°C. Prąd początkowy próbki podgrzanej do 100°C wykazuje o rząd większą wartość w porównaniu z prądem płynącym przez próbkę formowaną w temperaturze otoczenia. Prąd próbki formowanej w temperaturze 150 °C jest większy o pół rzędu od prądu próbki formowanej w temperaturze 100°C. Przedstawione wyniki badań (rys.3) wskazują na wpływ temperatury formowania na prąd początkowy próbki. W dalszym etapie formowania, po przekroczeniu kilkudziesięciu sekund, prąd próbki nie zależy od temperatury formowania.

Do badań napięcia zastępczego U_z przygotowano elektrety w temperaturze otoczenia oraz w temperaturach podwyższonych, zapewniając różne prędkości chłodzenia. Pomiaru napięcia zastępczego wykonywano po 24 - godzinnej przerwie od czasu zakończenia procesu formowania. Badania te prowadzono w obwodzie otwartym metodą kompensacyjną [6].

Na podstawie wyników pomiarów napięcia zastępczego dla poszczególnych próbek, wyznaczono ich średnie wartości dla elektretów formowanych w temperaturze otoczenia oraz w temperaturach podwyższonych. Wyniki obliczeń średnich wartości napięć zastępczych elektretów formowanych w temperaturze otoczenia, 100°C, 150°C, 250°C oraz 315°C przedstawiono w tabeli 1. Wyznaczono także różnicę pomiędzy napięciem zastępczym próbek a napięciem przyłożonym do siatki układu powietrznej triody.



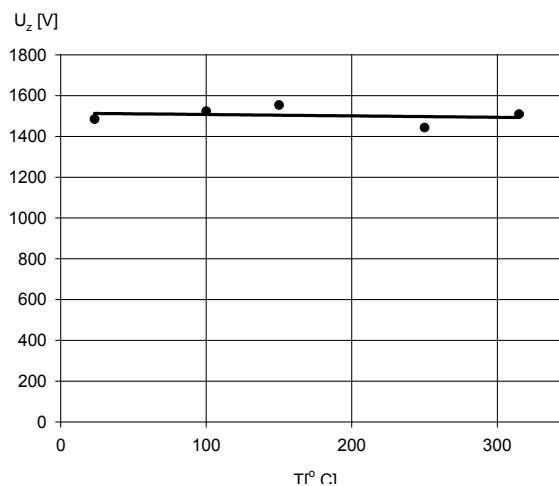
Rys.3. Przebieg zmian prądu próbki w czasie formowania w temperaturze otoczenia oraz w temperaturach 100°C i 150°C

Na podstawie analizy otrzymanych wyników ustalono, że wartości napięcia zastępczego różnią się między sobą nie więcej niż o 111 V. Różnica ta stanowi ok. 7,7% wartości napięcia przyłożonego do siatki stanowiska. Trend zmian wartości napięcia zastępczego próbek formowanych w temperaturze otoczenia oraz w temperaturach podwyższonych przedstawiono na rysunku 4.

Tabela 1. Średnie wartości napięcia zastępczego elektretów

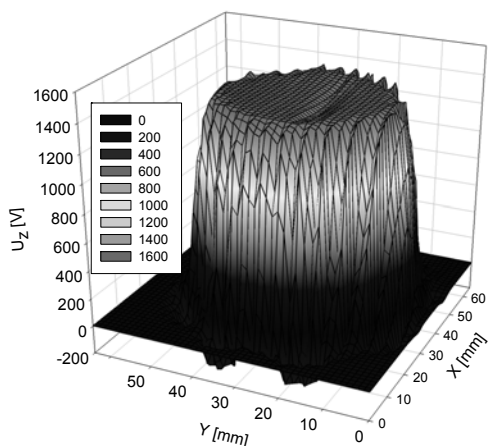
Temperatura formowania [°C]	T_o	100	150	250	315
Średnia wartość napięcia zastępczego [V]	1485	1523	1554	1443	1509

Zaprezentowane wyniki wskazują na brak zależności napięcia zastępczego elektretu od temperatury formowania.



Rys.4. Przebieg zmian wartości napięcia zastępczego próbek formowanych w T_o , 100°C, 150°C, 250°C oraz 315°C

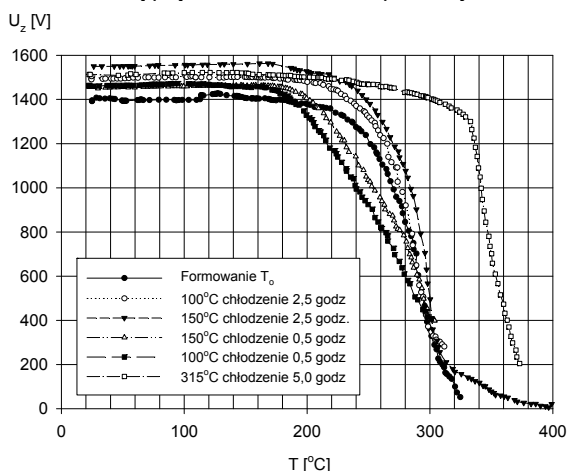
Dla weryfikacji warunków formowania elektretów, oprócz wcześniej wykonanych pomiarów napięcia zastępczego, zbadano także rozkład napięcia zastępczego na powierzchni, skanując je sondą pomiarową [6, 7, 8]. Przykładowy rozkład napięcia zastępczego na powierzchni elektretu uformowanego w 100°C pokazano na rysunku 5.



Rys.5. Rozkład napięcia zastępczego na powierzchni elektretu uformowanego w temperaturze 100°C

Otrzymane wyniki badania rozkładu napięcia zastępczego na powierzchni próbki potwierdzają celowość stosowania wieloigłowej elektrody ulotowej. Zastosowane rozwiązanie pozwoliło na uzyskanie równomiernego rozkładu napięcia zastępczego na powierzchni naelektryzowanej próbki. Równomierny rozkład dotyczy obszaru próbki o powierzchni 15,9 cm², nieostniętego w czasie formowania. Wyniki pomiarów napięcia zastępczego sondą kompensacyjną, w punktach oddalonych od siebie o 5 mm, różnią się nie więcej niż o 27 V, niezależnie od tego czy punkty leżą centralnie, czy na brzegach próbki.

W kolejnym etapie badań, uformowane elektrety w temperaturze otoczenia oraz w temperaturach podwyższonych przy wybranych czasach chłodzenia, poddano pomiarom napięcia zastępczego w funkcji rosnącej temperatury. Procedura badań polega na ciągłym pomiarze napięcia zastępczego rozładowywanego elektretu przy liniowo narastającej temperaturze [6]. W badaniach stosowano stałą prędkość narostu temperatury 2°C/min.



Rys.6. Termogramy zależności napięcia zastępczego od temperatury dla próbek formowanych w T_o, 100°C, 150°C, 315°C

Otrzymane charakterystyki rozładowania próbek formowanych w wybranych temperaturach pokazano na

rysunku 6. Posłużyły one do wyznaczenia parametrów uformowanych elektretów, energii aktywacji W procesu relaksacji ładunku i czasu życia elektretu τ .

Na podstawie otrzymanych przebiegów napięcia zastępczego w funkcji temperatury ustalono, że rozładowanie elektretów formowanych w temperaturze otoczenia rozpoczyna się w temperaturze ok. 200°C, formowanych w temperaturze 100°C i 150°C w temperaturach odpowiednio 210°C i 220°C, a dla temperatury 315°C w temperaturze ok. 315°C. Dla elektretów formowanych w temperaturach 100°C i 150°C, ale chłodzonych po uformowaniu z wyższą prędkością, rozładowanie rozpoczyna się w temperaturze 175°C.

Energję aktywacji procesu relaksacji W wyznaczono na podstawie zależności [9]

$$(1) \quad W = -\frac{kT_n^2}{U_n(T_n)} \operatorname{tg} \alpha$$

gdzie: W – energia aktywacji procesu relaksacji, k – stała Boltzmanna ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), T_n – temperatura w punkcie przecięcia, $U_n(T_n)$ – napięcie w punkcie przecięcia, α – kąt nachylenia stycznej do krzywej w punkcie przecięcia.

Czas życia elektretu wyznaczono posługując się zależnością [9]

$$(2) \quad \tau(T) \approx \frac{kT_e^2}{bW} \exp \frac{W}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_e} \right)$$

gdzie: W – energia aktywacji procesu relaksacji, k – stała Boltzmanna ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K), τ – czas życia elektretu, b – szybkość nagrzewania próbki, T_e – temperatura wyznaczona z termogramu dla $U_{z \max}/e$, T_o – temperatura otoczenia.

Wyznaczone, na podstawie zależności (1) i (2), wartości energii aktywacji oraz czasy życia dla elektretów formowanych w T_o oraz w temperaturach 100°C, 150°C, 315°C i chłodzonych z różną prędkością, podano w tabeli 2. Wyniki zestawione w tabeli 2 wskazują, że czasy życia ładunku silnie zależą od temperatury formowania i czasu chłodzenia próbki podczas formowania.

Tabela 2. Wartości energii aktywacji i czasy życia elektretów

Temperatura formowania [°C]	Czas chłodzenia [h]	$W_A \cdot 10^{-19}$ [J]	τ [lata]
T_o	-	1,18	$1,1 \times 10^1$
100	0,5	0,60	0,06
	2,5	1,70	$3,0 \times 10^3$
150	0,5	0,65	0,07
	2,5	2,23	$4,0 \times 10^6$
315	5	2,97	$3,7 \times 10^9$

Wzrost temperatury formowania i powolne chłodzenie prowadzi do wzrostu czasu życia ładunku elektretu. Skrócenie czasu chłodzenia powoduje wyraźne zmniejszenie czasu życia elektretu.

Wnioski

- Parametry elektrostatyczne elektretów zależą od warunków formowania.
- Zastosowanie wieloigłowej elektrody ulotowej pozwala na uzyskanie równomiernego rozkładu ładunku na powierzchni elektretu.
- Energia aktywacji procesu relaksacji zależy od zastosowanej temperatury formowania oraz czasu chłodzenia próbki.

- Szacowany czas życia elektretu jest tym dłuższy, im wyższa jest temperatura formowania i im dłużej zachodzi proces chłodzenia.
- Formowanie elektretów w podwyższonej temperaturze i powolne ich chłodzenie zapewnia dużą stabilność zgromadzonego ładunku.

Praca wykonana w Katedrze Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej w ramach zlecenia statutowego.

Autorzy: mgr inż. Jan Kupracz, Politechnika Wrocławska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: jan.kupracz@pwr.edu.pl; dr hab. inż. Bożena Łowkis, prof. nadzw. PWr, Politechnika Wrocławska, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: bozena.lowkis@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Hilczer B., Małecki J., Elektrety i piezopolimery, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (1992)
- [2] Sesser G. M., Electrets: recent developments, *Journal of Electrostatics* 51-52 (2001) 137-144
- [3] Giacometti J.A., Leal Ferreira G.F., Gross B., *A summary of corona charging methods*, Electrets, 6th International Symposium on Electrets, (ISE 6) Proceedings, (1988)
- [4] Molinie P., Charge injection in corona-charged polymeric films potential decay and current measurements, *Journal of Electrostatics* 45 (1999) 265 – 273
- [5] Chen G. A new model for surface potential decay of corona-charged polymers, *Journal of Physics D: Applied Physics* 43, (2010) 055405 (7pp)
- [6] Kacprzyk R., Wybrane zagadnienia badań ładunku i jego zaniku w dielektrykach stałych, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2004)
- [7] Moreno R. A., Gross B., Measurement of potential buildup and decay surface charge density and charging currents of corona-charged polymer foil electrets, *Journal of Applied Physics*, Volume 47, August 2008
- [8] Takuma T., Principle of Surface Charge Measurement for Thick Insulating Specimens IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 5 No. 4, August (1998) 497
- [9] Łowkis B., Motyl E. Investigations of the organic elektrets lifetime, Institute of Electrical Engineering Fundamentals, Technical University of Wrocław, *Materials Science*, Vol. VII, No.2-3, (1981)