

Mgr inż. Kazimierz Cywiński  
Wyższa Szkoła Inżynierska  
Zespół Urządzeń i Aparatów Elektrycznych  
Białystok

NAPRĘŻENIA MECHANICZNE W IZOLACJI JAKO CZYNNIK  
PRZYSPIESZAJĄCY PRZEBICIE NA SKUTEK DZIAŁANIA WYŁADOKAŃ  
NIEZUPEŁNYCH

1. Wstęp

Izolacji maszyn i urządzeń wysokonapięciowych stawia się coraz ostrzejsze wymagania przez podwyższanie jej klasy termicznej, stosowanie coraz wyższych napięć roboczych oraz dążenia do konstrukcji oszczędnych i technologicznych. Wynikające stąd złożone problemy natury technologicznej i konstrukcyjnej wymagają wnikliwego spojrzenia na udział poszczególnych narażeń fizykochemicznych w procesie konstrukcji izolacji. Jedną z grup narażeń są naprężenia mechaniczne. Naprężenia te mogą powstawać w procesie formowania izolacji /odlewanie, prasowanie itp./, jak również w eksploatacji /od uderzeń termicznych np. w transformatorach z izolacją stałą/.

Badania wpływu naprężeń mechanicznych na trwałość izolacji są bardzo kosztowne. Dlatego też autor prowadzi badania nad wyjaśnieniem wpływu naprężeń mechanicznych przyspieszających przebicie izolacji powodowane przez powstanie i rozwój wyładowań niezupełnych w warunkach modelowych.

Nieliczne sygnały w literaturze [5, 6] wskazują na to, że mało wyjaśniony jest problem oddziaływania naprężeń /niezależnie od przyczyn ich powstawania/ na wytrzymałość elektryczną czy też odporności

dielektryków na destrukcyjne działanie wyładowań niezupełnych. Warunki modelowe w jakich autor prowadzi badania tego problemu pozwalają ocenić wpływ naprężeń na wytrzymałość elektryczną jak też na przyspieszony rozwój wyładowań niezupełnych w sztucznie wytworzonych makrowtrącinach gazowych. Badania prowadzone są w układach, gdzie dielektryk jest naprężany siłami mechanicznymi przykładanymi z zewnątrz.

## 2. Rola naprężeń mechanicznych w powstawaniu i rozwoju defektów struktury izolacji wysokonapięciowej.

Własności wytrzymałościowe elektryczne dielektryków /typu polimery/ zależą głównie od budowy molekularnej i nadmolekularnej, zawartości i charakteru ciał obcych oraz od istnienia w nich wtrącin gazowych. Wtrąciny mogą powstawać w procesie formowania izolacji lub też w czasie eksploatacji.

W niewielu pracach [6, 4] podane są wzmianki o wyraźnym obniżaniu czasu życia izolacji przez naprężenia mechaniczne panujące na pograniczu obszaru wyładowań niezupełnych.

Wtrąciny gazowe w układach modelowych do badania wyładowań niezupełnych w dielektrykach stałych często wytwarza się przez ich wycięcie lub nawiercanie. Taki sposób przygotowania próbek izolacji wyraźnie obniża czas życia próbek. Przyczyną tego są naprężenia termomechaniczne powstające na pograniczu struktury obrabianej mechanicznie. Naprężenia te powodują zniszczenie struktury oraz powstawanie defektów w warstwie o określonej grubości.

Według Kinga i Königa [6] o przyspieszeniu procesów przebicia w tym przypadku decydują głównie wytworzone przy wierceniu mikropory, nie podają jednak bliższego wyjaśnienia ich charakteru. Podobne problemy występują przy wtapianiu lub wyciskaniu elektrod w strukturę badanego dielektryku.

W obszarze występowania naprężeń mechanicznych dielektryku powstają defekty struktury, które mogą przyjmować różne postacie i rozmiary, jako:

- punkty osłabienia wiązań łańcuchów na pograniczu fazy krystalicznej i amorficznej
- zerwane wiązania w łańcuchach /powstawanie rodników/
- submikrororysy /o wymiarach 10 - 1000 Å/
- mikrororysy
- makrororysy /pęknięcia/.

Metody dyfrakcji rentgenowskiej oraz rezonansu paramagnetycznego pozwoliły określić rozmiary defektów oraz zmierzyć ich gęstość [3,11]. Zależność, która obrazuje wpływ naprężeń mechanicznych rozciągających na gęstość submikrororys i dynamikę ich rozwoju w czasie dla orientowanej folii poliamidowej podano na rys.1. Stwierdzono także, iż powstawanie i rozwój tych defektów na podłożu termofluktuacyjne, gdyż okazało się, że energia aktywacji powstających defektów pokrywa się z energią termodestrukcji molekuł polimeru [3].

Według teorii wytrzymałości mechanicznej polimerów czas ich życia  $\tau_m$  można wyznaczyć ze wzoru:

$$\tau_m = \tau_{om} \cdot \exp \left/ \frac{U - G_r}{k \cdot T} \right/ \quad /1/$$

gdzie:  $\tau_{om}$ ,  $k$ ,  $U$  - stałe  
 $G_r$  - wielkość naprężeń mechanicznych rozciągających  
 $T$  - temperatura polimeru

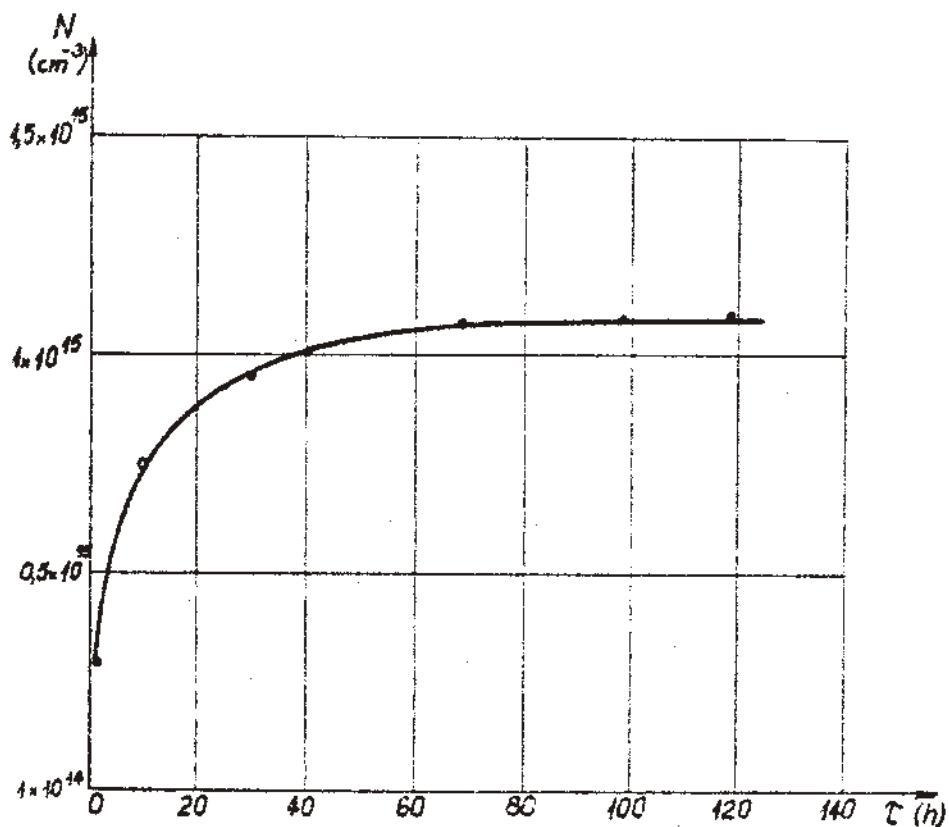
Zależność obejmująca wpływ naprężeń mechanicznych na szytkość rozwoju w czasie mikrodefektów  $N$  [3] podaje wzór 2:

$$N = N_0 \cdot \exp \left/ - \frac{Q_0 + \beta \sigma}{k, T} \right/ \quad /2/$$

gdzie:  $N_0$ ,  $k$ ,  $\beta$  - stałe

$Q_0$  - energia aktywacji w procesie powstawania defektów

$T$  - temperatura dielektryku.



Rys.1. Krzywa dynamiki rozwoju mikrorys przy stałym naprężeniu rozciągającym  $\sigma_r = 20 \text{ kg/mm}^2$  [11], materiał "Kapron"

Trwałość mechaniczna tworzyw, podobnie jak i w warunkach wyładowań niezupakowanych - elektryczna, zależą od procesów termodynamicznych przebiegających w strukturze polimeru, jak również od dynamiki rozwoju defektów struktury.

Do celów praktycznych najważniejsze jest wyjaśnienie wpływu naprężeń mechanicznych na powstawanie i rozwój przebiecia dielektryków, kiedy działają one na pograniczu wtrącin gazowych, pęknięć itp. W miejscach tych następują nawet przy niskich średnich wartościach tych naprężeń, lokalne, silne przepiężenia mechaniczne struktury właśnie na granicy przestrzeń gazowa - dielektryk stały. Ma tutaj miejsce przypadek silnej niejednorodności pola naprężeń mechanicznych.

Powstające w tych obszarach mikro i makrodefekty mogą być nawet w słabych polach elektrycznych przy udziale wyładowań niezupełnych rozwijane [1, 8]. Naprężenia mechaniczne w sposób gwałtowny mogą przyspieszać rozwój kanału przebiecia, szczególnie w przypadku dielektryków o dużym stopniu krystaliczności czy też silnych wiązaniach poprzecznych łańcuchów polimeru /żywica epoksydowa, polimetakrylan metylu itp/.

Efektom tego działania są więcej lub mniej rozwinięte czołowy kanału przebiecia i jego otoczenia. W żywicach epoksydowych widoczne są jako pęknięcia o dużych powierzchniach. W przypadku polietylenu widoczne są jako bardzo rozwinięte miotełki [7, 8]. W tworzywach zbrojonych lub zawierających wypełniacze składnik wypełniający osłabia rozwój "główek" submikro i mikrorys [2, 9].

W dielektrykach posiadających rozbudowane wiązania poprzeczne łańcuchów, powstawanie i rozwój defektów struktury odbywa się nagle, po przekroczeniu granicznych naprężeń mechanicznych. Naprężenia mechaniczne niższe od krytycznych powodują jedynie osłabienie wiązań co też musi rzutować na przyspieszenie erozji wskutek działania wyładowań niezupełnych na dielektryk. W takim przypadku ilość wyerodowanego dielektryku przez pojedyncze wyładowanie będzie wyższa o dodatkowy składnik  $V_1$ .

$$V = k \cdot W + V_1$$

gdzie:  $V$  - objętość wyerodowana przez pojedyncze wyładowanie

$k$  - stała materiałowa

$W$  - energia jednego wyładowania

Drugi składnik we wzorze /3/ jest trudny do oszacowania w przypadku naprężeń mechanicznych, które powodują powstawanie defektów struktury. Niekiedy słabe naprężenia mechaniczne mogą prowadzić do podwyższenia czasu życia izolacji, powodując wzrost stopnia uporządkowania struktury lub też przyczyniając się do przebudowy struktury /wzrost stopnia krystaliczności, orientacja łańcuchów itp./.

### 3. Układy elektrod do badania procesu erozji folii elektroizolacyjnych naprężanych mechanicznie.

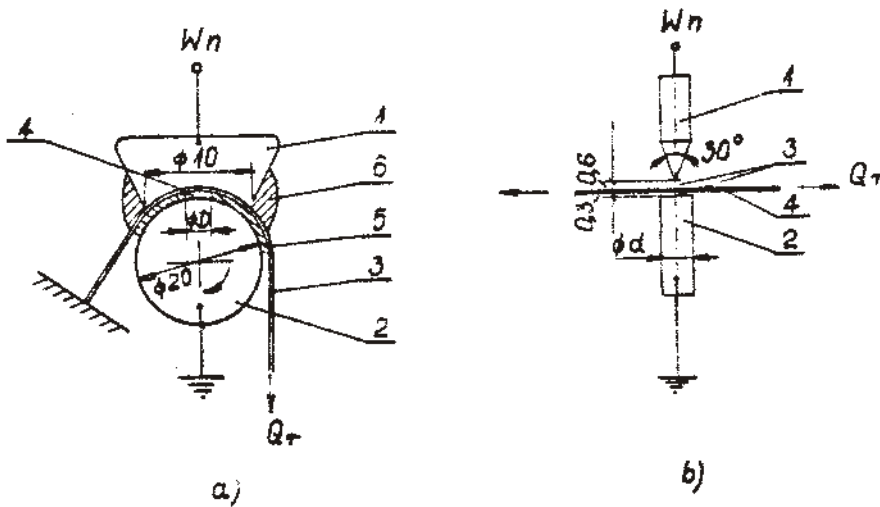
Badania wpływu naprężeń mechanicznych na proces destrukcji dielektryku przy współudziale wyładowań niezupełnych były prowadzone na modelach. Stosowano próbki folii o grubości od 30 do 200  $\mu\text{m}$ . Taki sposób nie wymaga używania kapitałochłonnych maszyn wytrzymałościowych.

Na tej drodze uzyskuje się wyniki, które w znacznym stopniu dają się przenieść na izolację grubowarstwową.

Zależność czasu życia folii od naprężeń mechanicznych rozciągających przykładanych z zewnątrz do dielektryku, badano w układzie elektrod przedstawionych na rys.2.

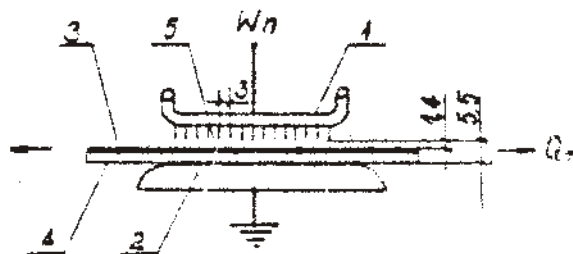
W układzie tym wytwarzano wtrącinę gazową cylindryczną "a" lub stosowano obszar wyładowań otwarty - przypadek "b". Układ "a" na tę zaletę, że wyeliminowany jest wolny dostęp powietrza.

W badaniach zastosowano także trzeci oryginalny układ elektrod, który pozwala dokładniej utrzymać stałą wielkość naprężeń mechanicznych rozciągających w całej przestrzeni dielektryka, ale wadą jego jest wolny dostęp powietrza /rys.3/. W tym układzie należy się spodziewać znacznego udziału wilgoci w rozwoju procesu erozji.



Rys.2. Układy do badania wpływu naprężeń mechanicznych na czas do przebicia.

- a - układ z zamkniętą wtrąciną, 1,2 -elektrody  
 3 - rozciągana folia, 4 - wtrącina powietrzna  
 o  $D = 2$  mm i  $g = 0,5$  mm, 5 - materiał osłonny (PCW,  
 6 - tworzywo wypełniające /wazelina techniczna  
 bezbarwna/,  $Q_r$  - siła rozciągająca folię  
 b - układ z obszarem wyładowania otwartym, 1,2 -  
 elektrody, 3 - rozciągana folia siłą  $Q_r$



Rys.3. Układ elektrod do mikroskopowych badań powierzchni erodowanej dielektryka. 1, - elektroda drabinkowa, 2 - elektroda płaska, 3 -rozciągana folia siłą  $Q_r$ , 4- przegroda szklana 5 - obszar wyładowań niesupełnych

Zastosowana bariera izolacyjna szklana pozwalała wyeliminować inicjowanie defektów wskutek tarcia w czasie naciągania folii. Następny układ zastosowany do wyznaczenia zależności wytrzymałości elektrycznej mierzonej doraźnie w funkcji naprężeń mechanicznych rozciągających folię nie odbiegał w swaj budowie od podobnych wymaganych przez normy.

#### 4. Wyniki pomiarów i spostrzeżenia.

Przedstawiono jedynie przykładowe wyniki badań, które jednak pozwalają potwierdzić postawioną hipotezę, jeśli chodzi o udział naprężeń mechanicznych w rozwoju wyładowań niezupełnych dielektryku dodatkowo naprężanego mechanicznie.

Zależność czasu do przebicia od naprężeń mechanicznych w układzie z rys.2a i b dla folii polistyrenowej przedstawia wykres na rys.4. Na podstawie tego wykresu i jemu podobnych, otrzymanych przez autora można przyjąć, że w znacznym zakresie zmian naprężeń mechanicznych zależność czasu do przebicia  $\tau$ , w funkcji tych naprężeń  $\sigma_m$ , przyjmuje postać formuły empirycznej:

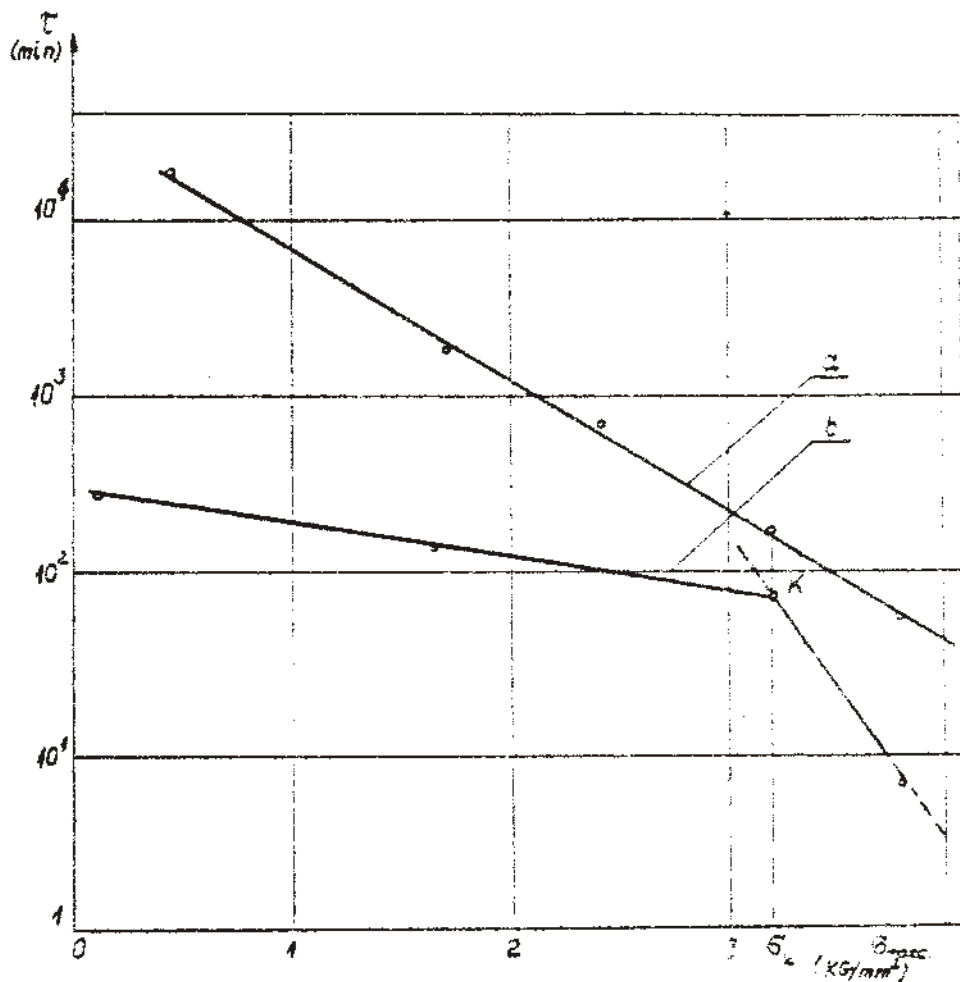
$$\tau = \tau_0 \cdot \exp / - A \cdot \sigma_m /$$

gdzie:  $\tau_0$  - stała zależna od rodzaju materiału oraz prawdopodobnie od wielkości energii wyładowań  
 $A$  - stała materiałowa.

Na wykresie 4 widać, że przy naprężeniach  $\sigma_m$  następuje nagłe obniżenie czasu życia folii co może wynikać ze spotęgowania rozwoju mikrodefektów przy współdziałaniu procesu utleniania. Mikrodefekty mogą prowadzić do lawinowego rozwoju kanału przebicia.

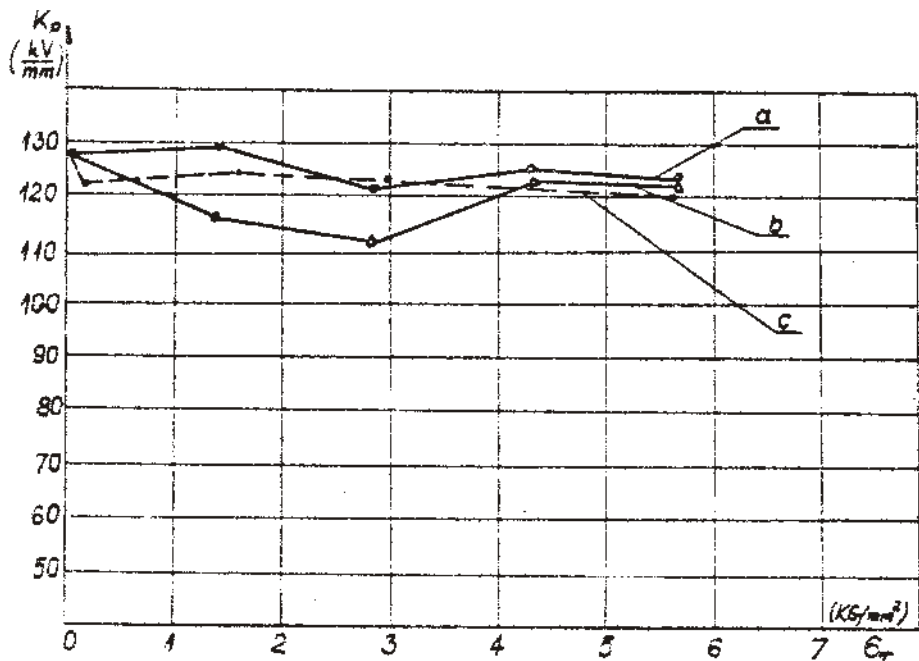
Rys. 4 przedstawia dla porównania uzyskaną zależność wytrzymałości elektrycznej doraźnej /napięcie o  $f = 50$  Hz/ od wysokości przyłożonych naprężeń mechanicznych na określony czas.





Rys.4. Zależność czasu do przebicia  $T$  od naprężeń mechanicznych rozciągających  $\sigma_p$ . Folie badane - Polistyren  $g = 80 \mu\text{m}$ ,  
 a/ w układzie elektrod z rys.1a  $U_{p50 \text{ Hz}} = 5 \text{ kV}$   
 b/ w układzie elektrod z rys.1b  $U_{p50 \text{ Hz}} = 7 \text{ kV}$

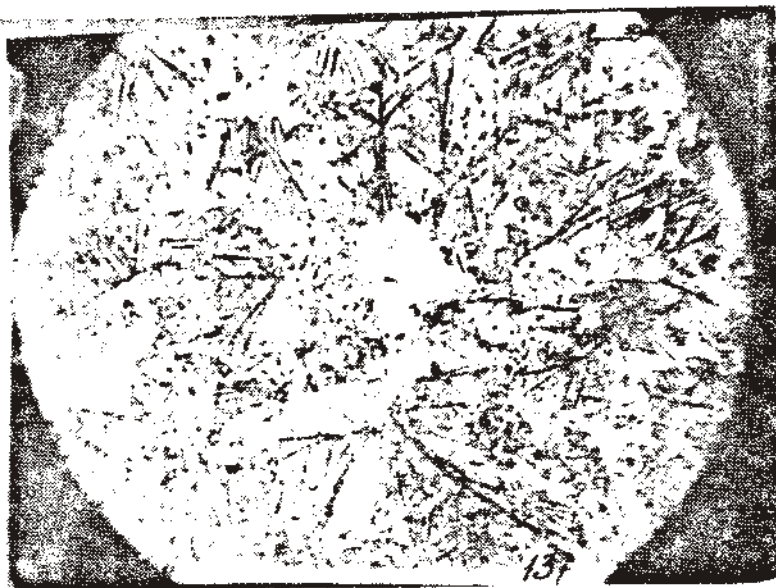
Uzyskane przebiegi wskazują, że naprężenia rozciągające, nawet bliskie wytrzymałości mechanicznej doczołnej, w małym stopniu zmieniają wytrzymałość elektryczną. W pewnych obszarach naprężeń nawet ją podwyższają, co można tłumaczyć przebudową struktury.



Rys. 5. Zależność wytrzymałości elektrycznej  $K_{p50}$  Hz od naprężeń rozciągających  $\sigma_r$ . Folia "Estrofol"  $g = 50 \mu m$   
 a - czas trwania naprężeń  $\sigma_r$  - 5 min  
 b - czas trwania naprężeń  $\sigma_r$  - 180 min  
 w obu przypadkach rozciąganie w oleju  
 c - czas trwania naprężeń - 2880 min, naprężenie folii w powietrzu, pomiar  $K_p$  po zdjęciu naprężeń

Przeprowadzone badania zmian strukturalnych w folii z PTE metoda spektrofotometrii w podczerwieni wskazują na zależność tych zmian zarówno od wielkości naprężeń mechanicznych, jak i od czasu ich przykładania do dielektryku.

Wykonane przykładowe zdjęcia mikroskopowe powierzchni folii polistyrenowej, poddawanej działaniu wyładowań niezupełnych, w układzie elektrod z rys. 3 wskazują na to, że na powierzchni tworzy się nalot jako mieszanina substancji ciekłych i stałych. Obraz nalotu zależy od wysokości naprężeń mechanicznych.



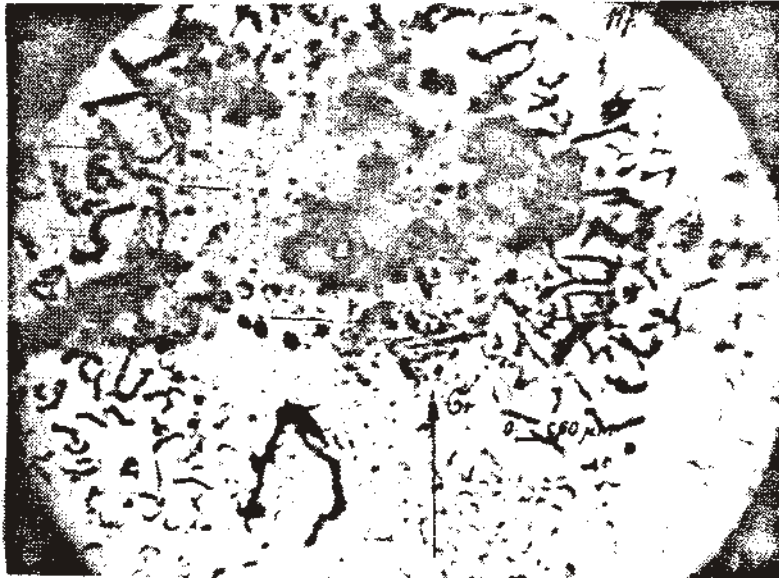
Fot.1. Zdjęcie mikroskopowe erodowanej powierzchni folii polistyrenowej /badania w układzie elektrod rys.3/.

$$U_{p50Hz} = 5 \text{ kV}, \text{ naprężenie } \frac{\sigma}{R_{\pi}} = 0,001$$

Silne naprężenia mechaniczne jakościowo zmieniają proces erozji, sprzyjając nrywaniu wiązań w łańcuchach [9 ,10] i prawdopodobnie powodują powstanie większej ilości związków lotnych a mniej ciekłych.

Jednocześnie należy przypuszczać, że związki ciekłe osłabiają proces erozji, gdyż lokalnie zwiększają konduktywność elektryczną powierzchni.

Na fot.1 widać także charakterystyczne mikrocrysy. Przypuszczalnie przebicie w obszarze rys następuje po wystąpieniu w ich obszarze dostatecznie wysokiej wartości natężenia pola elektrycznego.



Fot.2. Zdjęcia mikroskopowe erodowanej powierzchni folii polistyrenowej /badania w układzie elektrod rys.3/

$$U_{50\text{Hz}} = 5 \text{ kV, naprężenie } \frac{G}{H_M} = 0,68.$$

Otrzymane wyniki eksperymentalne wskazują, że działanie defektów struktury na przyspieszenie przebicia dielektryku zależy od rozkładu pola elektrycznego w dielektryku oraz od wartości natężenia

tego pola na pograniczu obszaru wyładowania niezupełnego. Prawdopodobnie szybkość rozwoju kanału przebicia w obszarze naprężonym mechanicznie zależy od dynamiki rozwoju w czasie defektów oraz od ich charakteru i wymiarów geometrycznych.

### Wnioski

1. Na przyspieszenie procesu przebicia dielektryku mają wpływ defekty struktury i stopień obniżenia energii aktywacji zrywania wiązań atomowych przez naprężenia zewnętrzne.
2. Proces rozwoju defektów struktury i ich udział w mechanizmie przebicia zależy od budowy molekularnej i nadmolekularnej dielektryku stałego.
3. Wydaje się, że wpływ naprężeń mechanicznych na przyspieszenie rozwoju erozji zależy od natężenia pola elektrycznego w dielektryku oraz od energii wyładowań niezupełnych.
4. Nawet wycinkowy obraz przedstawiający udział naprężeń mechanicznych w rozwoju destrukcji i przebicia dielektryków typu polimeru wskazuje na potrzebę uwzględnienia tych zjawisk w doskonaleniu technologii i konstrukcji elementów izolacyjnych.

### Literatura

1. Cywinski K. - Badania przebicia jonizacyjnego polimerów stałych z uwzględnieniem rozwoju defektów struktury. Konf. Jubileuszowa WSI Białyсток, listopad 1970r
2. Dittner E. - Der räumliche und zeitliche Entladungsaufbau in festen Isolierstoffen im ungleichförmigen Feld . t.2. Archiv für Elektrotechnik 1963 n.4s.287.
3. Gezalow W.S., Kuksenko A.J., Sluoker - Kinetika obrazowania submikroskopических трещин в полимерах под нагрузкой. Fiz.tv.tela, 1972, t.14, r.2, s.4k3.

4. Goliński J. - Wieloetapowy mechanizm przebiecia jonizacyjnego polimerów stałych. Przegląd Elektrotechniczny 1968r. z.7, s.289.
5. Jellonek K. - Schwingungsspannungen in Giesharzformstoffen und Schwingungsdrucke auf eingebettete Fremdwerk-Stoffe. Kunststoffe 56, 1966r. h.7, s.458.
6. Kind D., König P. - IEEE Tr. on El.Insul. 1968, nr.2, s.40
7. Hitchen D.W., Pratt O.S. - Treeing in Polyethylene as a Prelude to Breakdown. Pow.App.and syst. 1958, t.177, s.183.
8. Mc Mahon E.L., Maloney D.E., Ferkins I.R. - A study of effects corona polyethylene. Trans. AIEE, 1959, cz.III. str.654.
9. Praca zbiorowa /książka/ - Gas discharges and the Electricity. Suppl. Izl.London 1962, s.54c.
10. Kabek J.P. - Teoretyczne podstawy fotodegradacji i fotoutleniania polimerów. Polimery 1971, s.257.
11. Turkov S.N., Kukseko W.S., Slucker A.I. - Obrazovanie submikro-trescin v polimerach pod nagruzkoi. Fiz.tv.tiela, 1969, v.11, v.2, s.296.