

Kazimierz Cywiński

ROZWÓJ MECHANICZNO-JONIZACYJNEGO PRZEBICIA IZOLACJI Z MAKRORYSA PRZY ZMIENNYCH NAPRĘŻENIACH MECHANICZNYCH

1. Wstęp

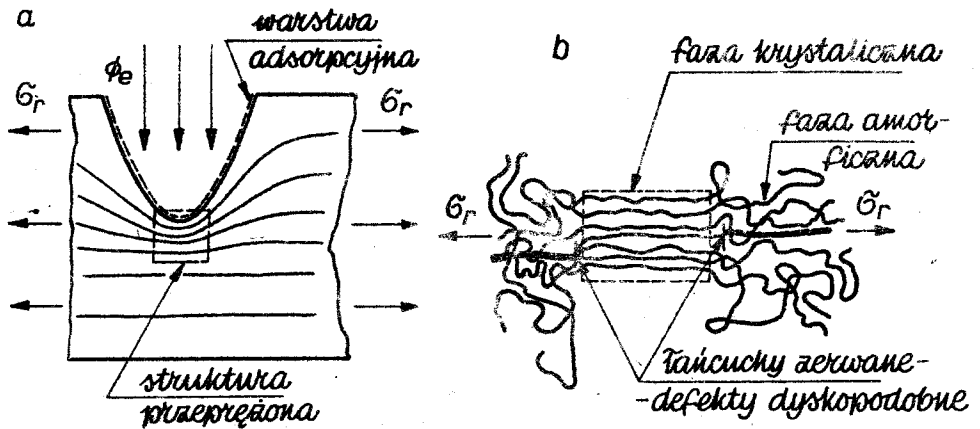
W wielu wysokonapięciowych konstrukcjach występują potechnologiczne lub rozwijają się w eksploatacji defekty generowane mechanicznymi naprężeniami. Naprężenia te mogą mieć charakter statyczny lub dynamiczny. Mogą one zostać wytworzone w dielektryku lub na pograniczu, np. dielektryk syntetyczny - tor prądowy. Naprężenia statyczne generują defekty, których aktywizująca rola w mechanizmach przebicia została opisana w pracach [1,2]. Szczególnie groźny dla trwałości izolacji staje się mechanizm mechano-elektryczny jonizacyjny. Najnowsze badania autora, w warunkach komórki probierczej z izolacją naprężoną mechanicznie [3] na czole, tzw. makrorysy, pozwalają eksponencjalnie skracać czasy prób. Autor przedstawia poniżej niektóre wyniki pomiarów żywotności elektrycznej T_e izolacji, na przykładzie próbek polietylenowych /PE/ z makrorysą, sztucznie wytworzoną. Próbkę starzono przy jednoczesnym oddziaływaniu wyładowań niezupełnych i impulsów siły rozciągającej.

2. Warunki rozwoju przebicia w PE z makrorysą jako koncentratorem naprężeń mechanicznych

Wykorzystane w badaniach próbki PE nacinano, wytwarzając tą drogą tzw. koncentrator naprężeń σ r mechanicznych rozciągających. Na rysun-

Dr inż. Kazimierz Cywiński - Politechnika Białostocka, Instytut Elektrotechniki

ku 1 pokazano kierunki naprężeń σ_r i działania wyładowań niezupełnych, wytwarzających strumienie elektronów Φ_e .



Rys.1. Makrorrysa jako koncentrator naprężeń σ_r .

Φ_e - strumień elektronów bombardujących czoło makrorrysy;
a/ warunki rozciągania PE z makrorryszą, bombardowanego strumieniem Φ_e ,

b/ kryształit w polu przepiężeń i przewidywana lokalizacja submikrodefektów dyskopodobnych.

Sztucznie wytworzona makrorrysa /wg rys.1/ pozwala w zasadzie badać wglębną nadmolekularną strukturę PE. Wskutek wycięcia zdejmujemy przypowierzchniową warstwę nadstruktury, której budowa może znacznie różnić się od wglębnej [5]. Z punktu widzenia potrzeb ujęcia możliwie wiernie faz destrukcji izolacji PE, wnioski z tych badań mogą być przeniesione w całości do praktyki technologicznej. Przed czołem makrorrysy udaje się wytworzyć niemal graniczne gęstości defektów N [1] sięgające $10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, przykładając niezbyt silne naprężenia σ_r . W miejscu przepiężeń /rys.1a/ dominują defekty dyskopodobne, których lokalizację pokazuje rysunek 1b. Defekty dyskopodobne rodzą się na granicy faz: uporządkowanej /kryształitu/ i amorficznej. Pojedyncze łańcuchy, najsilniej przepiężone, zostają zrywane. Prawdopodobnie gęstość obję-

tościowa tych defektów jest wysoka w warunkach "udarowego" przyłożenia naprężeń σ_r . Z uwagi na występowanie w eksploatacji nie wyjaśnionych przebiegów izolacji, dokonano tutaj próby zbadania, czy warunki czasowe przyłożenia naprężeń σ_r decydują o żywotności T_e izolacji, na przykładzie polimeru liniowego PE.

Jak wpływają dorywcze mechaniczne naprężenia na proces rozwoju przebicia w warunkach wyładowań niezupełnych?

Każdy z impulsów wyładowań, dając strumień elektronów Φ_e bombardujących warstwę adsorpcyjną na powierzchni makrorysy, dostarcza w głąb struktury przepiężonej /rys.1a/ określoną dawkę elektronów pierwotnych i wtórnych.

Na pograniczu fazy krystalicznej /wytworzonej w procesie formowania PE lub wskutek zimnej orientacji od σ_r / i amorficznej, w miejscach zerwań łańcuchów, są wytwarzane dyskopodobne defekty. Inne defekty, tutaj wytworzone, to przesunięcia łańcuchów, ich obroty, a szczególnie przesunięcia i odkształcenia elementów nadstruktury. One to aktywizują proces penetracji PE przez globalny strumień elektronów Φ_e . Po wypełnieniu struktury PE odpowiednią ilością elektronów, na przedłużeniu czoła makrorysy następuje przebicie.

Szczególnym przypadkiem dynamiki przykładanych naprężeń σ_r są impulsy siły rozciągającej, zgodnie z kierunkiem σ_r /rys.1a/, przykładane przed oddziaływaniem na PE wyładowań niezupełnych i po ich rozpoczęciu. Nawet krótkotrwały impuls siły wytwarza defekty [6]. Dynamika ich rozwoju i pozornego zbliżniania po usunięciu źródła naprężeń σ_r , musi zależeć od max wartości σ_r , czasu jego trwania, stromości wzrostu $\frac{d\sigma}{dt}$ i obniżania. Można postawić tezę ogólną, że nawet impulsem siły wytworzone defekty aktywizują proces przebicia izolacji. Po zaniku siły nie występuje "zbliżnianie" defektów dyskopodobnych. Ich rozmiary atomowe mogą się jedynie zmienić. Dodatkowo musi mieć miejsce proces przebudowy struktury [3]. Może też wystąpić np. wzrost ilości fazy krystalicznej. Odbić się to może na charakterystyce

$$\bar{t}_e = f / Q_m$$

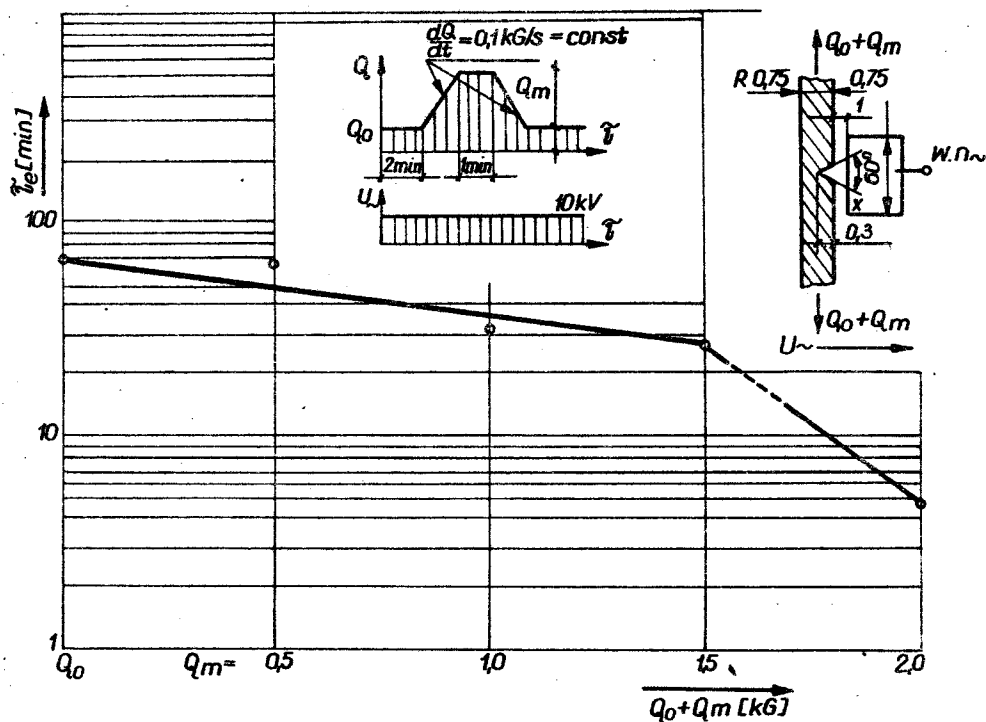
przez podwyższenie czasu \bar{t}_e . W miejscach zerwanych wiązań łańcucha wytworzenie rodników i nasycenia ich otoczenia elektronami ze strumienia Φ_e może jeszcze bardziej komplikować proces przebudowy nadstruktury. W efekcie impuls siły, szczególnie przy wysokich poziomach Q_m , może wywołać umocnienie elektryczne izolacji chwilowo przepiężonej. Te zjawiska należy w badaniach starzeniowych izolacji PE rozpatrywać jako jej mechano-elektryczną historię, rozpatrywaną w okresie przed przyłożeniem i po przyłożeniu pola elektrycznego.

3. Charakterystyki życia \bar{t}_e izolacji PE z makrorysą

Stosunkowo poważny stan rozpoznania roli defektów generowanych w polimerach mechanicznymi, statycznymi naprężeniami [1,2,3] umożliwia przejście do badań roli dynamicznych naprężeń. W badanych próbkach PE będą utrzymywane makrodefekty jako koncentratory naprężeń σ_r . W badaniach używano próbki PE. Podstawą do wykresów były pomiary \bar{t}_e , wykonywane na 5 lub 10 próbkach. Czasy średnie \bar{t}_e wyznaczono, korzystając z rozkładu Weibulla [1]. W badaniach wykorzystano komórkę probierczą opisaną w [3]. Profil makrorysy pokazuje rysunek 2. Próbki PE o grubości ścianki 0,75 mm naprężono impulsową siłą Q o wartości $\max Q_m$ i przebiegu tej siły $Q = f / t$ według szkiców na rysunkach 2, 3 i 4. Impulsy siły przykładano w różnych momentach czasowych w stosunku do rozpoczęcia wyładowań niezupełnych przy napięciach U i $f = 50$ Hz. Na rysunku 2 jest widoczny przebieg $\bar{t}_e = f / Q_m$ przy stale utrzymywanym naprężeniu resztowym oznaczonym przez Q_0 /naprężenie od ciężaru uchwytu do przykładania siły Q_m /. W tej serii pomiarów zachowywano $\frac{dQ}{dt} = 0,1$ kG/s = const. Przyjęcie tego warunku pozwala zbliżyć do siebie termodynamiczne i mechaniczne podobieństwo procesu rozpadu łańcuchów $/CH_2/n$ i nadstruktury PE, przy różnych wartościach Q_m impulsu siły. Na charakterystyce $\bar{t}_e = f / Q_0 + Q_m$ są widoczne dwie strefy naprężeń różnie opisujące aktywność elektronową defektów. Teoretycznie powinny

występować trzy strefy [12] spadku czasu życia $\tilde{\tau}_e$ izolacji PE.

I strefę obejmują tzw. słabe naprężenia. Ich rola w praktyce konstrukcyjnej jest mało istotna. W II strefie już silniejsze naprężenia przegrupowują elementy nadstruktury, powodują konformacje łańcuchów i wreszcie zrywają łańcuchy. Te ostatnie defekty już mogą stworzyć ogniska. Sumaryczna gęstość defektów N/cm^{-3} tutaj jest jeszcze umiarkowana. Po zaniku impulsu siły część z defektów zabliznia się. Proces zablizniania odbywa się z określoną stałą czasową.

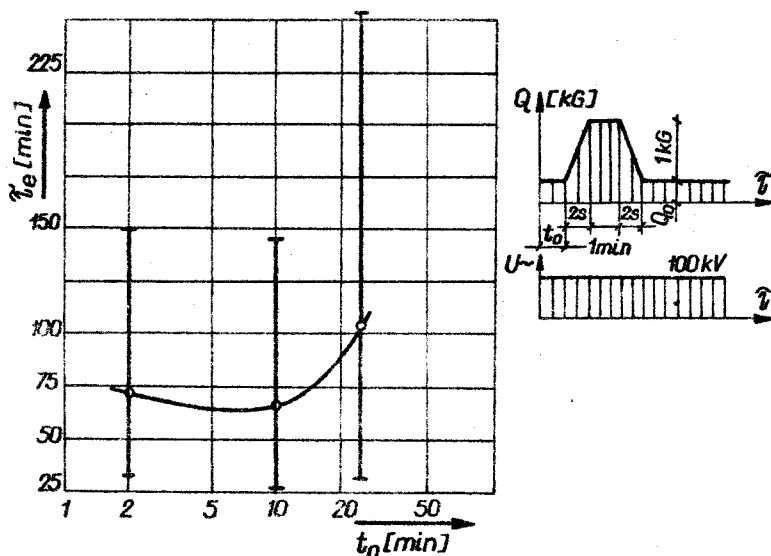


Rys.2. Zależność czasu życia $\tilde{\tau}_e$ od amplitudy Q_m przy $\frac{dQ}{dt} = \text{const}$.
Starzenie przy $U \sim = 10 \text{ kV}$. $Q_0 = 0,63 \text{ kG}$

Po zaniku siły Q_m już struktura nie wraca do wyjściowej. W otoczeniu czoła makrorysy przenikanie elektronów po zdjęciu siły Q_m jest spowolnione. W strefie III potęguje się rozwój ogniska defektów wokół czoła makrorysy. Można nazwać ten proces katastroficznym. Następuje jedno-

oczesnie "zimna" orientacja struktury i jej następstwem jest wzrost ilości fazy uporządkowanej w PE. Gęstość defektów jest bardzo wysoka. W tych warunkach nachylenie przebiegu $\tilde{\nu}_e = f/Q_m$ jest bardzo strome. Ogólny stąd wniosek, że nawet dorywcze impulsowe naprężenia Q_m wyraźnie obniżają żywotność $\tilde{\nu}_e$ izolacji. Jest to wniosek ważny dla praktyki konstrukcyjnej.

Nie mniej ciekawa dla praktyki jest charakterystyka z rysunku 3. Ukazuje ona wpływ opóźnienia t_0 przyłożenia impulsu siły Q_m umiarkowanej, np. 1 kG do próbek PE z makrorysą jak na rysunku 1. Widać z niej, że znaczne opóźnienie przyłożenia naprężeń σ r impulsowych może w pew-

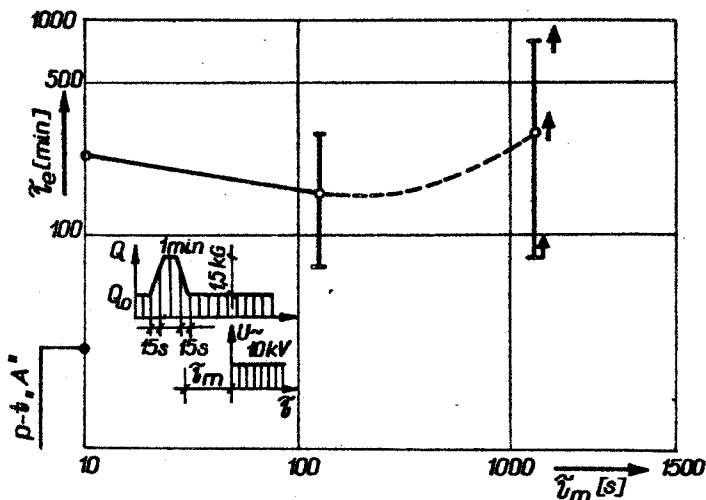


Rys. 3. Charakterystyka wpływu opóźnienia naprężeń t_0 na czas życia $\tilde{\nu}_e$. Układ probierczy z rysunku 2

nych przedziałach obniżyć czas życia $\tilde{\nu}_e$, a dalsze opóźnianie może niejako podnieść żywotność izolacji. Wydaje się, że o tej nieregularności przebiegu $\tilde{\nu}_e = f/t_0/Q_m = \text{const}$ decydują z jednej strony gęstość defektów N , a z drugiej - umocnienie struktury PE wolnego od naprężeń i podanego starzeniu wyładowaniami. Może mieć tutaj miejsce proces sieciowania. Dalsze badania w tym kierunku będą prowadzone.

W warunkach eksploatacji izolacji polimerowej ważnym przypadkiem na-

rażeń mechanicznych jest "przeszłość" naprężeniowa. Z badań wynika, jak pokazuje rysunek 4, że nawet jednostkowy impuls siły Q_m , np. 1,5 kg, zmienia $\tilde{\nu}_e$. Przykładanie impulsów siły Q_m tzw. zadawnionych może znacznie podwyższyć żywotność $\tilde{\nu}_e$. Krótsze czasy $\tilde{\nu}_m$ mogą tę żywotność obniżyć.



Rys.4. Wpływ czasu wyprzedzenia $\tilde{\nu}_m$ naprężeń na $\tilde{\nu}_e$
Punkt A dotyczy analogicznych warunków jak z rysunku 2

Przy tym efekcie należy ująć następujące procesy: wytwarzanie "nowej" nadstruktury zorientowanej, przebudowa warstwy adsorpcyjnej podczas działania Q_m i wytwarzania defektów. Sygnalizowano już wcześniej w opracowaniu [1], że aktywność elektronowa struktury nadmolekularnej, zorientowanej jest niska. Aktywność "zabliźnionych" defektów jest chyba niewysoka. Dla porównania z żywotnością izolacji naprężonej siłą Q_m już po rozpoczęciu procesu starzenia wyładowaniami zaznaczono punkt A, wzięty z analogicznych badań jak na rysunku 2 / $Q_m = 1,5$ kg, czasy impulsu 2 min, czoło 3s-1 min-3s/. Wyraźnie widać, że próbki z tzw. historią naprężeniową mają wyższe $\tilde{\nu}_e$. Należy tutaj zaznaczyć, że uogólnianie tych spostrzeżeń należy podbudować szerokimi badaniami mikroskopowymi. Następną serię badań podjęto, by wyjaśnić zachowanie się PE przy różnych typach impulsów siły, jak i różne profile makrorysy.

3. Wnioski

- Stwierdzono wyraźną zależność czasu życia $\bar{\tau}_e$ PE z makrorysą od parametrów kształtu impulsu siły Q_m .

- Impuls siły Q_m rozciągającej PE z makrorysą wytwarza defekty utrzymujące się po zdjęciu tej siły. Na charakterystyce $\bar{\tau}_e = f/Q_m$ tej izolacji występują trzy strefy spadku żywotności.

- Charakterystyki z rysunków 3 i 4 wskazują na zależność $\bar{\tau}_e$ od $\frac{dQ_m}{dt}$ impulsu siły i od jego momentu przyłożenia.

Próbki PE z tzw. historią naprężeniową mają inną żywotność $\bar{\tau}_e$ niż wolne od naprężeń.

Podobne efekty mogą mieć miejsce w innych tworzywach starzonych jonizacyjnie.

LITERATURA

1. Cywiński K.: Trwałość i wytrzymałość elektryczna syntetycznej stałej izolacji naprężonej mechanicznie. Rozpr.dokt.Politechnika Łódzka, 1975.
2. Cywiński K. : Niektóre problemy mechano-jonizacyjnego przebicia folii elektroizolacyjnych z mechanicznie wytworzonymi defektami struktury. Sympozjum n.t. Wyładów.niezup. AGH Kraków 1975. Mat. konf. s.113.
3. Cywiński K.: Zgł.pat.nr P-17914e: Komórka probiercza do mechano-elekt.starzenia próbek izolacji stałej. 1975.
4. Mc Mahon E.I.: The Chemistry of Corona Degradation of Organic Insulating Materials in High - Voltage Fields and under Mechanical Strain. JEEE Trans. on El. 1966, vol EI-3, No 1, s.3.
5. Muccigrosso J., Phillips P.I.: The Morphology of Cross-Linked Polyethylene Insulation. JEEE Trans.El.Insul., vol EI-13. No 3, 1976, s.172.
6. Niemiec J. i inni: Procnost plastmass. Izd. Masinostr. Moskwa 1970.

Summary

MECHANICAL-ELECTRICAL BREAK DOWN IN POLYMERS WITH CRACK
IN VARIABLE TENSILE-STRESSES FIELD

In the paper the characteristics of live time of polymers dielectrics as variable tensile stresses function are described. When the mechanical pulse stress and the corona discharges are attacked then the live times of polymer insulation are decreased.

The pulse mechanical strain generates the stable defects in the polymer structures. The life of polymer insulation is dependent of the character of mechanical strain pulse.