

Kazimierz Cywiński

MECHANIZM PRZEBICIA IZOLACJI POLIMEROWEJ  
W WARUNKACH DYNAMIKI ROZWOJU DEFECTÓW  
DYSKOPODOBNYCH

1. Wstęp

Wiele publikacji opisujących mechanizmy destrukcji izolacji wysokonapięciowej opartej na polimerach ostatnio eksponuje mechaniczne naprężenia jako czynnik istotny. Zajęto się też tym problemem w ujęciu potrzeb izolacji kriogenicznej [1] .

Brak jest jednak prac, które mechano-elektryczne przebicia ujmą opisem molekularnym.

Ponizej autor podejmuje rozważania o roli defektów generowanych mechanicznie w warunkach naprężeń zmieniających się w czasie.

Do rozważań fizykalnych przyjęto model próbki izolacyjnej z tzw. koncentratorem naprężeń. Dla uproszczenia rozważań głównie omawia się rolę strumienia elektronów pierwotnych  $\phi_{ei}$  w procesie przebicia.

Elektrony te strefy wyładowań niezupełnych bombardują powierzchnię krzywizny koncentratora naprężeń, którym jest ostra nacięta makrorysa [2] .

Wytworzenie naprężeń zmieniających się dynamicznie jakby aktywizuje defekty w procesie emisji wtórnej elektronowej pod czokiem makrorysy.

Rozważono i zbadano wybrane przypadki zmiennych naprężeń rozciągających  $\sigma_r$  . Jeden to harmonicznie zmieniające się w czasie z częstotliwością  $\omega$  , drugi zaś - to strome przykładowie  $\sigma_r$  , ustalone za czokiem, które opisuje się funkcją  $\frac{d\sigma_r}{dt}$  .

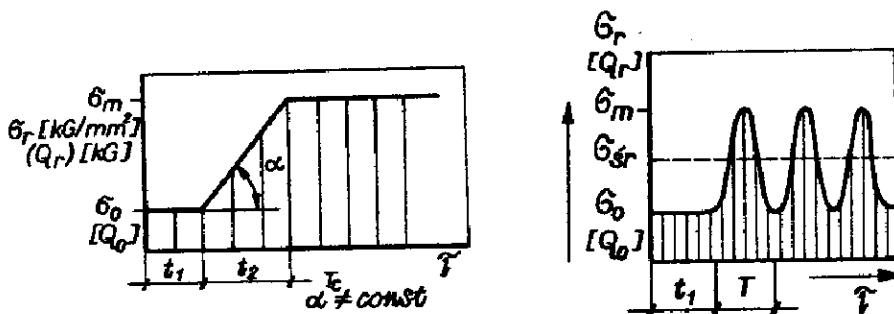
---

dr inż. Kazimierz Cywiński - Instytut Elektrotechniki Politechniki Białostockiej.

Korzystając z osiągnięć fizyki molekularnej w dziedzinie rozpoznania mechanicznej destrukcji struktur łańcuchowych i wykonując wiele serii pomiarów laboratoryjnych autor dokonuje próby pogłębienia opisu procesu mechano-elektrycznej destrukcji izolacji. Rozważania głównie dotyczą polimerów liniowych.

## 2. Dynamika zmian naprężeń mechanicznych

Potrzeby projektowe nakazywałyby rozpoznanie wielu typów zmian naprężeń  $\sigma_r$  i ich roli w przyspieszaniu destrukcji izolacji wysokonapięciowej. W próbach i rozważaniach skupiono się na dwóch charakterystycznych przypadkach. Wykazano to na rysunku 1.



Rys. 1. Przykładowe dynamiki naprężeń  $\sigma_r$  /lub sił  $Q_r$  / :  
a - dynamiczny wzrost  $Q_m$  - czoło  $T_c$ , b - zmiana charac-  
niczna z okresem  $T$

Przypadek a/ pozwala zbadać zachowanie się polimeru w warunkach udarowego przyłożenia siły  $Q_r$ , zaś b/ odtwarza często występujące w konstrukcjach procesy zmęczeniowe przy jednoczesnym atakowaniu polimeru wyładowaniami niezupełnymi z fazy gazowej.

Prowadzone badania w tym zakresie, którym stawia się zadania inżynierskie [1], te problemy jakby omijają. Ukazane tutaj rozważania wskazują, że nieodłącznym w każdym badaniach mechano-elektrycznych zjawisk jest rozpoznawanie udziału nawet chwilowo panujących efektów dynamicznych. Oprócz poziomu naprężeń  $\sigma_r$  jest też ważna zmiana ich w czasie, czyli  $\frac{d\sigma_r}{dt}$

Autor pracy [2] zajmował się defektami dyskopodobnymi.

Postęp w dziedzinie badań strukturalnych nad polimerami umożliwia głębsze rozpoznanie natury tych defektów i ich obrazu w czasie. Na ten obszar ma wpływ istotny dynamika zjawisk destrukcyjnych o naturze mechanicznej.

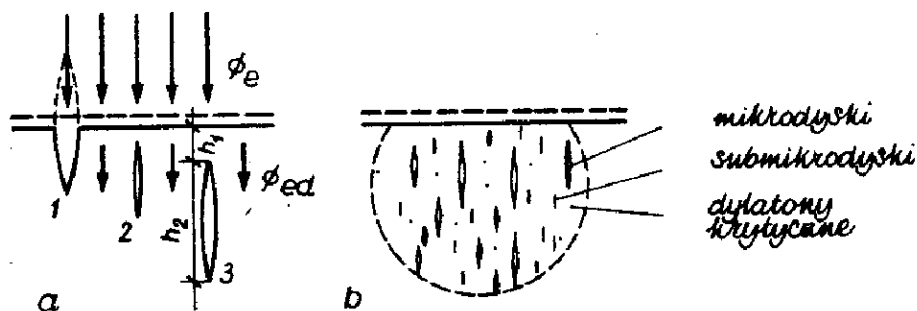
### 3. Mechano-elektryczna destrukcja polimerów

Uproszczony opis mechano-elektrycznego przebicia folii i grubszych warstw polimerowych zawiera praca [2]. Uwypuklona jest tam rola defektów dyskopodobnych. Współczesne prace z dziedziny fizyki polimerów wskazują, że dyskopodobne defekty są tylko jednymi z wielu defektów. W strefie przepięzonych łańcuchów następuje zaburzenie stabilnych drgań atomów i cząstek [3]. Następują przesunięcia atomów, a w ślad za tym spektra drgań przesuwają się w stronę niskich częstotliwości. Potwierdza ją to komputerowe obliczenia dla łańcuchów wyidealizowanych, lokalnie przepięzonych. W otoczeniu ogniwa przepięzonego rozkład poziomów energetycznych atomów i cząstek wyraźnie się zmienia. Następstwem tego może być obniżanie bariery energetycznej do przechodzenia elektronów w pasmo przewodnictwa. Mają za tym przemawiać tzw. egzoelektrony, generowane w procesie naprężeń polimerów.

Wydaje się, że zmienne naprężenie  $\sigma$  /rys. 1a i b/ mogą być traktowane jako proces powolny w stosunku do przesunięć molekularnych. W miarę przemieszczenia drgających ogniw łańcuchów przepięzonych następuje kolektywne przesuwanie wielu elektronów do strefy walencyjnej. Można przypuszczać, że te efekty lokalizują się głównie na czole dyskopodobnych defektów. Wiemy, że w łańcuchach polimeru liniowego wiązania wzdłuż łańcucha są silne, a "poprzeczne" jako słabe. Dużej gęstości defektów dyskopodobnych spodziewać się można na pograniczu fazy amorficznej i krystalicznej. Te uszkodzenia w sensie termodynamicznym można porównywać do nagłych fazowych przejść cząstek wolnych od naprężeń [4].

Przepięzone ogniwa struktury z następstwami w postaci zaburzeń drgań próbuje się określać jako element struktury - dylaton. Wydaje się, że dylatony oddziałują na zaburzenia drgań w ogniwach sąsiednich i na procesy generacji defektów w sąsiedztwie. Na tak defektowaną strukturę działają pierwotne i wtórne elektrody  $\phi_{ed}$  z przestrzeni wyładowań nie-

zupełnych - rysunek 2. Działanie jonów celowo się pomija w tych procesach.



Rys.2. Oddziaływanie strumienia elektronów  $\phi_e$  na ogniska defektów :  
a - rodzaje dysków, b - ognisko defektów

Elektrony  $\phi_e$  wzbogacają strumień  $\phi_{ed}$ , szczególnie w przestrzeni ognisk defektów /rys. 2b/. Badania wykazują [5], że podczas bombardowania cienkich warstw fazy stałej /np.  $B_e$  itp./ strumieniem elektronów z próżni /przy  $E_p = 1 - 100$  eV/ elektrony powtórnie wychodzą z warstwy bombardowanej, z głębokości nawet do 30 monosłojów atomowych [5]. Te elektrony zubożają strumień  $\phi_{ed}$ , a więc opóźniają proces przebiecia struktury naprężonej. Wydaje się, szczególnie gdy elektrony podają na defekty typu "2" z rys. 2a, że prawdopodobieństwo ich wyjścia powrotnego jest małe. Te defekty więc niejako wzbogacają strumień  $\phi_{ed}$ , a najbardziej dokonują tego ogniska z rys. 2b. Defekty te i inne natomiast po przedyfundowaniu do nich cząstek fazy gazowej będą mniej aktywne. Z pracy [5] wynika, że przy energii elektronów  $E_p$  rzędu 1 eV im niższa jest ta  $E_p$ , tym więcej elektronów powrotnie wychodzi ze struktury. Wydaje się, że elektrony, nawet te o niskiej  $E_p$  ze strefy dysku, powrotnie nie wychodzą. Dyskopodobne defekty są rozłożone w strukturze realnego polimeru bardzo nieregularnie. Spodziewać się więc można przeto wielu nieregularności na przebiegach charakterystyk  $\tilde{v}_e = f(\sigma_r)$ ,

$$\tilde{v}_e = f\left(\frac{d\sigma}{dt}\right), \quad \tilde{v}_e = f(U) \quad \text{przy } \sigma = \text{const lub } \sigma \neq \text{const itp.}$$

/rys. 1a i b/.

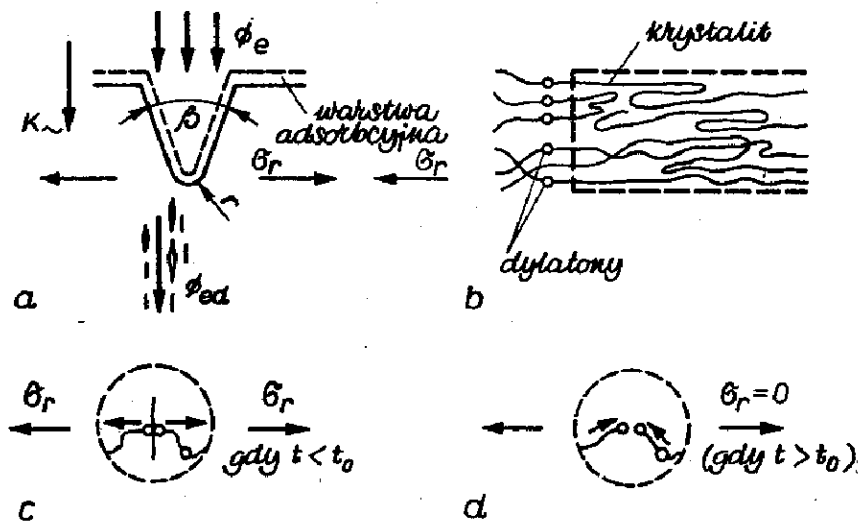
Możliwe jest nawet, że tak przepięte struktury przy małej gęstości

defektów  $N/1/cm^3$  / będą miały  $\tau_e$  wyższe niż wolne od wytworzonych defektów /  $\sigma_r = 0$  /. Takie efekty autor zauważył w dawniej prowadzonych przez siebie badaniach [2] .

#### 4. Zmienny obraz defektów a strumień elektronów $\phi_{ed}$

Przy naprężeniach z rys. 1a i b i im podobnych ilość defektów  $N$  z upływem czasu zmienia się.

Dynamiczna generacja gęstości defektów  $N$  następuje w przedziale czasu  $t_z$  /rys. 1a/, a z upływem czasu część z tych defektów ulega zabliznieniu, mimo że  $\sigma_r = \text{const}$ . W warunkach najgroźniejszego stanu naprężeń, jakim jest otoczenie czoła koncentratora naprężeń z rys. 3a, generowane są defekty stabilne, zabliznione i przebudowuje się lokalnie submikro i mikrostruktura.



Rys.3. Powstawanie i zanik defektów : a - przed czołem makrorysy, b - dylatonów, c - submikrodefektu, d - zabliznienie submikrodefektu

W warunkach stanu naprężeń z rys. 1a im krótszy jest czas  $t_z$ , tym więcej ogniw jest naprężanych, rośnie więc ilość dylatonów, można się spodziewać, że gęstość dylatonów krytycznych rodzących defekty dyskopodobne też wzrasta. Spodziewać się można, że po czasie  $t_z$  wskutek konfor-

macji rośnie ilość defektów "d", pozwoli jednak może przebywać "b" i "c", jeśli poziom  $\sigma_r$  jest bliski niszczącego. Defekty "d" jako zabliznione też mogą potęgować strumień  $\phi_{ed}$ .

W przypadku naprężeń według rysunku 1b o ilości dyskopodobnych defektów N ognisk tych defektów i zabliznionych decydują procesy lokalne mikrotermiczne wokół dylatonów krytycznych i czół dysków.

O kumulacji ciepła także zadecydują: poziom  $\sigma_r$  oraz częstotści  $\omega$ . Mają tu miejsce konformacje, które mogą zablizniać defekty. Krótkie okresy T konformacjom nie będą sprzyjać. Wzbogacanie strumienia  $\phi_{ed}$  będzie zależeć tu od zjawisk termicznych.

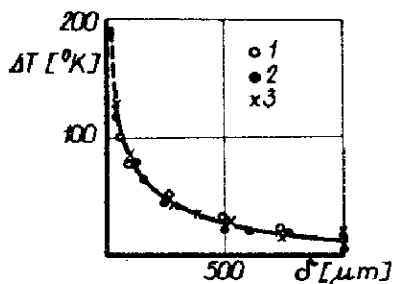
### 5. Procesy mikrotermiczne w otoczeniu defektów

W otoczeniu dylatomu krytycznego rodzącego defekt dyskopodobny i następnie przed czołem przesuwanego się dysku następuje mikrolokalny wzrost temperatury. Energią tą dysponują cząstki przy czole dysku. W warunkach zmiennych w czasie naprężeń  $\sigma_r$  /rys. 1a i b/ mają miejsce następujące zjawiska:

- mikrolokalny wzrost temperatury wokół dylatonów,
- dysypacja energii przez fazę amorficzną i krystaliczną,
- procesy mikrotermiczne przebudowują nadstrukturę łańcuchów,
- powstawanie i zabliznianie defektów,
- elektrony w otoczeniu dylatonów i w polu elektrycznym są przemieszczane w kierunku głównie osi dłuższej dysków,
- prawdopodobnie egzoemisja elektronów.

Niektóre z tych zjawisk aktywizują wyzwalańia elektronów w strumieniu  $\phi_{ed}$ . Mogą też powstawać pułapki wychytujące wprowadzone do struktury elektrony. W otoczeniu przemieszczającego się np. czoła makrororys [4] przy użyciu czujników na podczerwień stwierdzono destrukcyjne przyrosty temperatur  $\Delta T$  - rys. 4. Z tej krzywej wynika, że idąc w kierunku wymiarów atomowych na granicy submikrodefektów przyrosty  $\Delta T$  będą coraz wyższe. Te przyrosty  $\Delta T$  odpowiadają również za dysocjację cząstek, ale i ta przebudowę submikrostruktur. Powodują też relaksację naprężeń  $\sigma_r$  w rejonie "gorącej" strefy. Na granicy "gorącej" muszą tworzyć się dynamicznie nowe ogniska dylatonów lub otwartych defektów.

Należy się spodziewać, że im wyższa stromość  $\frac{d\sigma_r}{dt}$  /rys. 1a/, tym na przykład w PE powstanie więcej ognisk dylatonów i dysków N.



Rys.4. Lokalny przyrost temperatury w funkcji szerokości "gorącej" strefy  $\delta$  /4/.  
Temp. próbki /°K/ : 1-233, 2-295, 3-356

To powinno obniżać czas życia  $\tilde{t}_e$ . Przy stromych przyrostach /udary mechaniczne/ czas życia w izolacji powinien być znacznie niższy niż w warunkach statycznych.

Przy naprężeniach zmiennych, np. gdy :

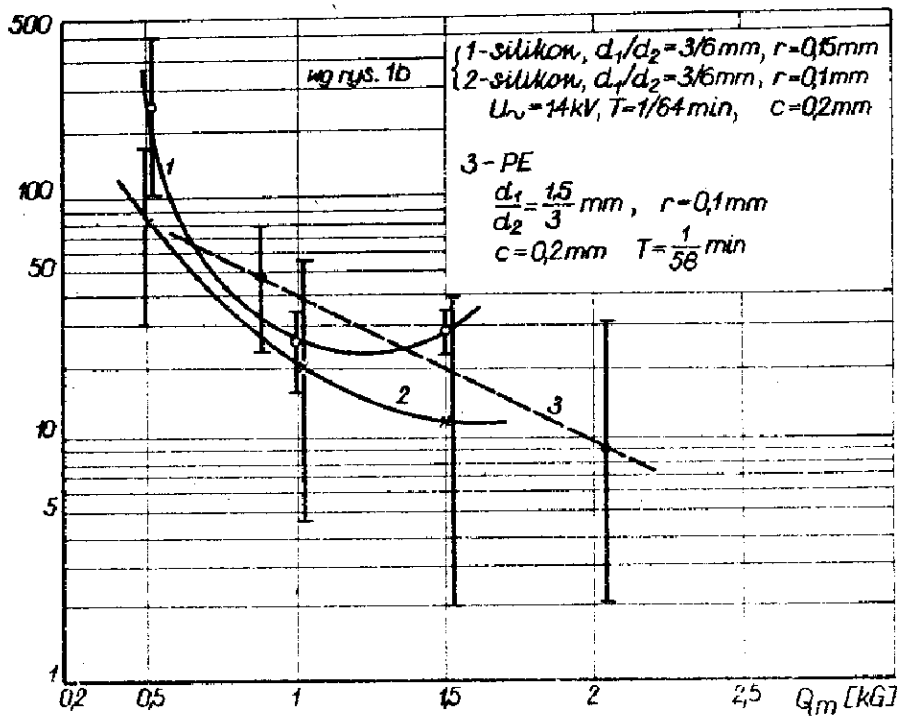
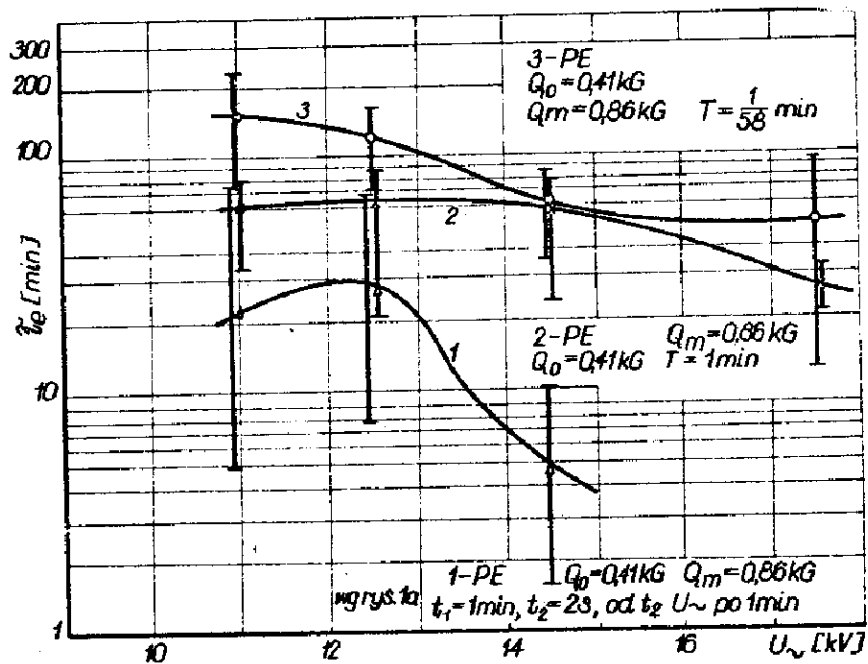
$$\sigma_r = \sigma_0 + \frac{\sigma_m - \sigma_0}{2} (1 + \sin \omega t) \quad /1/$$

procesy mikrotermiczne potęgują się szczególnie przy wysokich  $\omega$ . Im wyższe  $\omega$ , tym  $\tilde{t}_e$  powinno być niższe. Jednak z drugiej strony może być odwrotnie, gdy ze wzrostem  $\omega$  dominuje przebudowa struktury, a nie procesy termiczne. Naprężenia zmienne ze wzoru /1/ sprzyjają dyfuzji cząstek gazowych z fazy gazowej do mikrodysków /rys. 2a - 2/. Wydyfundowane atomy mogą ograniczyć strumień  $\phi_{ed}$  /rys. 2a/.

## 6. Wyniki badań eksperymentalnych

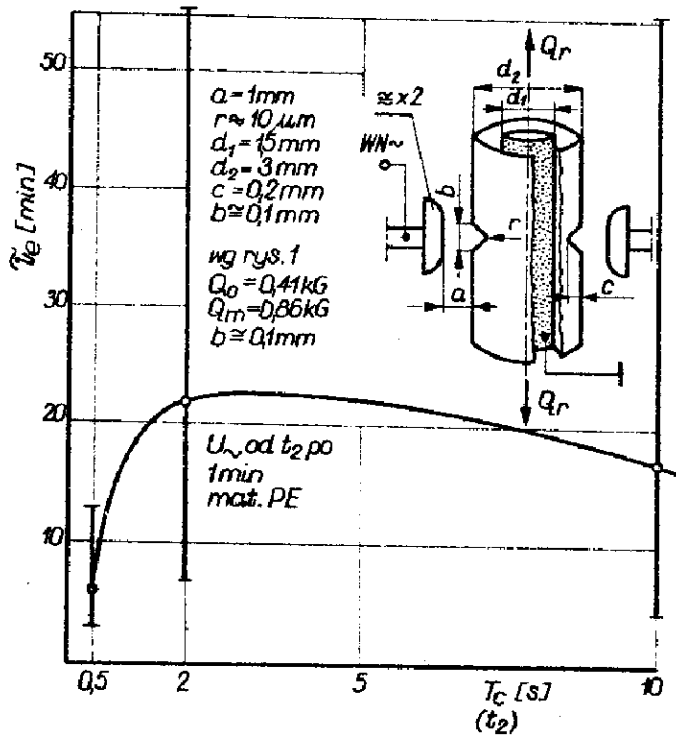
Korzystając z idei komórki probierczej z rys. 5c zdejmowano charakterystyki  $\tilde{t}_e = f(\sigma_r)$ ,  $\tilde{t}_e = f(t_z)$  - rys. 1a,  $\tilde{t}_e = f(\omega)$  przy różnych poziomach  $U_{\sim}$  i  $\sigma_r$ . Na makrorysę oddziaływały wyładowania niezupełne. Makrorysę nacinano i podgrzewano, by uzyskać odpowiedni promień czoła  $r$ . Zabieg ten doprowadzał do orientacji łańcuchów PE przy ostrzu /rys. 3a/. Warunki przykładania siły  $Q_r$  i naprężeń  $\sigma_r$  podają rys. 1 i szkice na rys. 5a, b i c.

Z charakterystyk 5a widać, że niezależnie od rodzaju naprężeń  $\tilde{t}_e$  nie zależy regularnie od poziomu  $U_{\sim}$ . W pobliżu 12,5 kV czasy  $\tilde{t}_e$  są najwyższe. Może to pochodzić od zróżnicowanego przenikania elektronów do  $\phi_{ed}$  w zależności od energii  $E_e$ . Ważne tu są głównie kąty rozwarcia : makrorysy mikrorysy i submikrorysy.



Rys.5 Charakterystyki dynamiczne żywotności  $\tau_e$  jako funkcje :  
 a/ -  $U_{\sim}$  przy różnych  $Q_m$  i  $T$  /rys. 1b/, b/ - przy  $U_{\sim} = 14 \text{ kV}$   
 dla rurek "silikon" i PE,





Rys.5 Charakterystyki dynamiczne żywotności  $\tilde{\nu}_e$  jako funkcje :  
 c/ -  $T_c = t_2$  /rys. 1a/ przy  $Q_m = \text{const.}$  dla PE

Przebiegi "b" to wzrost  $\tilde{\nu}_e$  przy wyższych  $\omega$ , przy różnych  $G_r$ . Chyba odpowiada za to silna konformacja łańcuchów, która umacnia strukturę PE i obniża gęstość dylatonów D i defektów N. Może też pochodzić to od rozbudowy objętości fazy krystalicznej, mniej wydajnej we wzbogacaniu  $\phi_{ed}$ . Wydaje się, że dalszemu wzrostowi  $\omega$  powinno towarzyszyć obniżenie  $\tilde{\nu}_e$ , temu poświęcone będą dalsze badania. Strony wzrost  $\frac{dG_r}{dt}$  /rys. 5c/ powoduje obniżanie  $\tilde{\nu}_e$ .

Duża ilość defektów różnej natury aktywizuje emisję wtórną.

Wniosek dla praktyki jest jeden : w warunkach dynamiki napreżeń i oddziaływania wyładowań na izolację unikać należy uderów mechanicznych.

### 7. Wnioski

- Rozważania fizykalne na podstawie współczesnego stanu wiedzy o naturze defektów w polimerach wykazują, że o mechano-elektrycznym przebiegu decydują nie tylko dyskopodobne defekty, ale i dylatony oraz defekty zblizni one.

- Wyniki badań laboratoryjnych na modelu izolacyjnym z koncentratorem naprężeń ukazują wpływ powstawania i zanikania defektów na czas życia  $\tilde{\nu}_e$  izolacji.

- Dynamika naprężeń harmonicznie zmiennych i impulsowych, a nie tylko poziom naprężeń  $\sigma_T$  decydują o czasach  $\tilde{\nu}_e$ .

### Literatura

1. Park C.H. i inni : Effects of Mechanical Stresses on the Dielectric Breakdown Strength of PET and FRP. IEEE Trans. on El. Insulat. vol. E1-17 No 3 s. 234.
2. Cywiński K. : Trwałość i wytrzymałość elektryczna syntetycznej stałej izolacji naprężonej mechanicznie. Pr.dokt.Pol.Łódzka 1974 r.
3. Kusov A.A. i inni : Rasčet dolgovečnosti nagružennoj cepocki atomov v angarmoničeskom približenij. Fiz. tv. tela t.22 v. 11 1980
4. Egorov B.A. i inni : Ekzotiermičeski je effiekt y prie rozryvie polimierov. Fiz. tv. tiela t. 17 vyp.1 1975 c. 111 + 117.
5. Erškova T.P. i inni : Opriedielenije głubiny vychoda kogierentouprugotražennych elektronov o energijam 1 + 1000 eV. Fiz.tv tiela t.24 vyp. 4.04.1982 c.1258 + 1260.