VI SYMPOZJUM
PROBLEMY EKSPLOATACJI
UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA
Zakopane, 23–25 października 1997

Jerzy Ranachowski*, Przemysław Ranachowski*

METODYKA WYZNACZANIA „CZASU ŻYCIA" CERAMICZNEGO TWORZYWA IZOLATOROWEGO

Streszczenie: Przedstawiono model matematyczny „czasu życia" oparty na fizycznym modelu wytrzymałości mechanicznej materiałów ceramicznych, opisano proponowaną procedurę obliczania parametrów tego modelu.

Słowa kluczowe: izolatory ceramiczne, czas życia

1. Wytrzymałość mechaniczna krótkotrwała

Wytrzymałością mechaniczną określa się zdolność materiału do wytrzymywania obciążeń bez utraty jego wewnętrznej spójności. Podstawowy wpływ na tę wytrzymałość mają dla izolatorów ceramicznych mikropęknięcia i pory, zwłaszcza wydłużone, tworzące się w pierwszym etapie procesu wypalania. Jest to jedna z przyczyn, dla których wytrzymałość mechaniczna materiałów ceramicznych wykazuje tak duże zróżnicowanie przy różnych sposobach obciążania. Wytrzymałość materiałów ceramicznych zależy również silnie od czasu. Wytrzymałość krótkotrwała uzależniona jest od ilości i rozkładu defektów oraz ich orientacji. Ostateczne zniszczenie uwarunkowane jest pojawieniem się i wzrostem krytycznej wady materiału. Ta zależność wytrzymałości od pojawienia się krytycznej wady wymaga statystycznego podejścia do wytrzymałości materiałów kruchych, do których należą tworzywa ceramiczne. Najbardziej znany i stosowany model zniszczenia kruchego stanowi model Weibulla, zakładający pojawienie się słabego ogniwa w łańcuchu elementów w określonej objętości struktury. Zgodnie z założeniami teorii Weibulla prawdopodobieństwo wystąpienia kruchego zniszczenia P_f (Probability of failure) określić można z zależności:

$$P_f = 1 - \exp\left[-V\left(\frac{\sigma_z - \sigma_u}{\sigma_0}\right)^m\right] \tag{1}$$

* Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Świętokrzyska 11/12, 00-044 Warszawa

gdzie: σ_z — naprężenie niszczące, σ_u — naprężenie progowe dla którego $P_f = 0$, przy czym często $\sigma_u = 0$, σ_0 — charakterystyczne naprężenie niszczące dla $P_f = 63{,}2\%$, m — moduł Weibulla, V — objętość materiału.

Współczynnik m, zwany modułem Weibulla, związany jest z gęstością prawdopodobieństwa wystąpienia krytycznego defektu. Im większa jest wartość tym węższy jest przedział wielkości defektów krytycznych. W związku z tym maleje prawdopodobieństwo zniszczenia poszczególnych próbek. Ze wzoru (1) wynika również, że średnia wytrzymałość na zerwanie jest odwrotnie proporcjonalna do objętości badanych próbek w potędze zależnej od modułu Weibulla $V^{1/m}$. Dla m równego ∞ wytrzymałość przestaje być wartością statystyczną. W przypadku porcelany elektrotechnicznej wartość współczynnika m zawiera się w przedziale 5÷12.

2. Długotrwała wytrzymałość eksploatacyjna

Efekt obniżania się wytrzymałości ceramiki i szkieł w czasie eksploatacji jest znany od dawna. Stąd przy zastosowaniu ceramiki jako materiału konstrukcyjnego cecha ta musi być brana pod uwagę w następujących przypadkach:

- przy porównywaniu własności poszczególnych rodzajów mas,
- przy porównywaniu własności wyrobów produkowanych przez różnych wytwórców,
- przy ocenie granicznego czasu pracy w warunkach eksploatacji.

Model powolnego wzrostu szczeliny oparty jest na rozważaniach zależności współczynnika intensywności naprężeń K_I od prędkości wzrostu szczeliny. Zależność ta jest wykorzystywana do prognozowania „czasu życia" wyrobu ceramicznego. Prędkość wzrostu mikropęknięć dla większości materiałów ceramicznych opisuje zależność:

$$V = A\, K_I^n \tag{2}$$

gdzie: współczynnik A i wykładnik n są parametrami propagacji pęknięć podkrytycznych. Zależą one od materiału, warunków prób, temperatury i otaczającego środowiska, stąd też muszą być wyznaczane doświadczalnie.

Z mechaniki kruchego pękania wynika, że naprężenie niszczące kształtki w postaci znormalizowanej beleczki bez karbu (30 × 7,4 × 3 mm) σ_f jest zależne od szybkości przyrostu naprężenia i wyraża się wzorem:

$$\sigma_f^{n+1} = R\sigma_c^{n-2}\frac{d\sigma}{dt} \tag{3}$$

gdzie: n — wykładnik ze wzoru (2), σ_c — największe naprężenie, przy którym nie następuje wzrost pęknięć; $R = B(n+1)$, przy czym B oblicza się według;

$$B = \frac{2}{\left[(n-2)AY^2K_{Ic}^{n-2}\right]} \tag{3a}$$

Y przyjmuje się dla danej konfiguracji szczeliny jako równy 1,29. K_{Ic} oznacza krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń. K_{Ic} wyznacza się na znormalizowanych beleczkach z karbem lub metodą wgłębnikową. Sposób wyznaczania omówiono szerzej w punkcie 4.

Po zlogarytmowaniu równanie (3) otrzymuje postać:

$$\log \sigma_f = \frac{1}{n+1} \log \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) + \frac{1}{n+1} \log \left[B(n+1)\sigma_c^{n-2} \right] \tag{4}$$

W układzie współrzędnych $x = \log \sigma_f$, $y = \log \left(\frac{d\sigma}{dt}\right)$ równanie (4) przedstawia linię prostą o nachyleniu równym $\left(\frac{1}{n+1}\right)$. Z nachylenia tej prostej wyznacza się wykładnik n. W tym celu należy wykonać pomiary wytrzymałości na zginanie czterech grup próbek o liczności co najmniej po 30 sztuk. Znormalizowane beleczki bez karbu powinny być łamane w procesie trójpunktowego zginania przy prędkościach przyrostu odkształcenia $\left(\frac{dy}{dt}\right)$ równych 0,001, 0,01, 0,1 oraz 1 mm/min. Z powyższej próby wyznacza się następujące wielkości dla każdej z próbek:

$S_i = \sigma_i$ — naprężenie niszczące [MPa],

$P_i = \dfrac{nr\ pr\acute{o}bki}{liczba\ pr\acute{o}bek + 1}$ — prawdopodobieństwo zniszczenia,

$X_i = \log S_i$,

$Y_i = \log \ln \left(\dfrac{1}{1 - P_i} \right)$.

Próbki należy uporządkować przypisując im numery wg rosnących wartości naprężenia niszczącego.

Uzyskanie w pomiarach wartości X_i oraz Y_i pozwalają na wyznaczenie dla każdej z badanych grup prędkości zginania wartości parametrów Weibulla m oraz J, gdzie $J = -m \log \sigma_0$. Są to nachylenia i punkty przecięcia z osią rzędnych prostych aproksymujących metodą najmniejszych kwadratów zbiór punktów o współrzędnych (X_i, Y_i).

Znając parametry rozkładu m, J oraz σ_0 wylicza się dla poszczególnych prędkości obciążania mediany rozkładów $\sigma_{0,5}$ czyli dla $P_i = 0{,}5$. Wartości n oraz A ze wzoru (2) wyznaczane są w oparciu o zależność (4). Przyjmując $\sigma_f = \sigma_{0,5}$ w układzie współrzędnych $\log \sigma_f - \log \frac{d\sigma}{dt}$ równanie (4) przedstawia prostą o nachyleniu $\frac{n}{n+1}$ i wartością przecięcia z osią rzędnych równą:

$$\frac{1}{n+1} \log \left[B(n+1)\sigma_c^{n-2} \right]$$

Dla każdej szybkości zginania uzyskuje się wartości $\sigma_f = \sigma_{0,5}$ oraz $\frac{d\sigma}{dt}$.

Wytrzymałość σ_c równa jest średniej wytrzymałości dla prędkości zginania 1 mm/min. Prosta aproksymująca cztery powyższe punkty pozwala otrzymać wartość n i B, a następnie w oparciu o zależność (3a) również parametr A.

Znając parametry prognozowania trwałości tworzywa izolatorowego: n, $\log A$, $\log B$, m, J oraz K_{Ic} możliwe jest uzyskanie zależności minimalnego czasu do zniszczenia w funkcji naprężenia eksploatacyjnego σ_a i zakładając określone przeciążenie $\frac{\sigma_p}{\sigma_a}$:

$$\log t_{\min} = \log B - 2 \log \sigma_a + (n-2) \log \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_a} \right) \tag{5}$$

„Czas życia" tworzywa izolatorowego badanego obiektu, przy wybranej wartości prawdopodobieństwa P_i, przedstawia zależność:

$$\log t_f = \frac{n-2}{m} \log P_i - n \log \sigma_a - \frac{n-2}{m} J + \log B \tag{6}$$

Przedstawiając graficznie zależności (5) i (6) przyjmuje się zazwyczaj przeciążenia σ_P/σ_a w granicach 1,5÷3,0 oraz wartości prawdopodobieństwa P_i = 0,01(1%) oraz P_i = 0,001(1%).

3. Próba przeciążeniowa

Opisane powyżej badania mechaniczne na próbkach pozwalają określić rozkład wartości prawdopodobieństwa zniszczenia. Na podstawie równań (5) i (6) określić można łącznie prawdopodobieństwo zniszczenia próbki oraz minimalny czas eksploatacji. Po dokonaniu obliczeń sporządza się wykres łączący zależności na $\log t_{\min}$ (minimalny czas eksploatacji) oraz $\log t_f$ (prognozowany czas zniszczenia) w funkcji naprężenia. Zakładają określony, minimalny czas eksploatacji (czas życia) oraz znając naprężenie eksploatacyjne (maksymalne obciążenie izolatora w sieci) można przy zadanym poziomie ufności stwierdzić jakie przeciążenia krótkotrwałe musi wytrzymać tworzywo badanego izolatora. Na wykres nanosi się szereg równoległych prostych odpowiadających zależności (5) dla różnych wartości przeciążenia σ_P/σ_a.

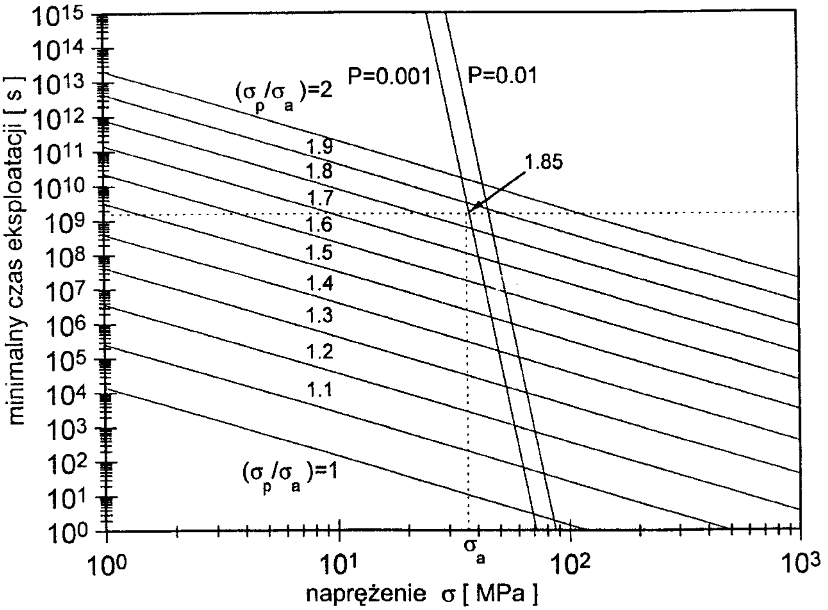
Następnie nanosi się równoległe proste odpowiadające zależności (6) dla różnych przyjmowanych poziomów ufności (zwykle $P_i = 0{,}01 \div 0{,}001$). Punkt odpowiadający natężeniu eksploatacyjnemu σ_a przecinającemu się z prostą opisującą „czas życia" tworzywa przy zadanym prawdopodobieństwie pozwala na odczytanie wartości przeciążenia, a stąd σ_p. Graficzne przedstawienie powyższych zależności obrazuje rysunek 21 pozycji literaturowej [1] — w niniejszym opracowaniu rysunek 1.

Powyższą metodą obliczane były minimalne wartości czasów eksploatacji izolatorów polskich [1], szwedzkich [2] oraz niemieckich [3].

4. Parametry prognozowania trwałości tworzyw ceramicznych

Do parametrów pozwalających na prognozowanie minimalnego czasu eksploatacji, które muszą być wyznaczone na drodze pomiarowej należą:

- Parametry rozkładu Weibulla — tzw. moduł Weibulla m oraz J dla prędkości odkształcania próbek równej 1 mm/min dla próby trójpunktowego zginania znormalizowanych beleczek bez karbu oraz próby przetężeniowej. W celu wyznaczenia dalszych parametrów należy przeprowadzić pomiary na co najmniej 4 seriach próbek beleczkowych po co najmniej 30 sztuk łamanych przy prędkościach 0,001, 0,01, 0,1 oraz 1 mm/min.
- W celu wyznaczenia parametrów n, B oraz A (zależności 4 i 3a) muszą być znalezione prędkości wzrostu naprężenia $\frac{d\sigma}{dt}$ [MPa/s] oraz mediany rozkładu $\sigma_{0,5}$ [MPa] dla czterech serii próbek wymienionych prędkości odkształcania.



Rys. 1. *Wykres prognozowania czasu życia badanego izolatora LP-75/31W (1995 r.) z uwzględnieniem prawdopodobieństwa zniszczenia*

- K_{Ic} — krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń w momencie katastroficznego rozprzestrzeniania się pęknięcia w materiale. Współczynnik ten jest stałą materiałową związaną z odpornością tworzywa na kruche pękanie. Najprościej K_{Ia} wyznaczyć można metodą wgłębnikową Vickersa [4]. Metody tej jednak nie można stosować w przypadku porcelany elektrotechnicznej o porowatości powyżej 3%. Dla takiego tworzywa K_{Ic} wyznacza się metodą trójpunktowego łamania beleczek z karbem [5], zgodnie z normą ASTME 399-90 oraz PN-87/H-04355.

Literatura

[1] **Ranachowski J., Rejmund F., Bertrand J.**: *Jakość i niezawodność izolatorów elektroenergetycznych; Nowoczesne metody badań i technologie materiałów ceramicznych*; Wyd. IPPT PAN, Warszawa - Mądralin, 1997

[2] **Persson L.**: *Swedish State Power Board Raport*, Vattenfall, Failure of Switchgear Insulators after Long Service, Raport, May 1987

[3] **Ranachowski J., Rejmund F., Bertrand J.**: *Ocena przydatności metody przeciążeniowej prognozowania „czasu życia” w zastosowaniu do tworzywa izolatorów wysokonapięciowych. Elektryczne i akustyczne metody badań materiałów i struktur biologicznych*; Wyd. IPPT PAN, Warszawa - Jabłonna, 1984

[4] **Niihara K., Morena R., Hasselmann D. P. H**; *Evaluation of K_{Ic} of brittle solids by the indentation method with low cracb-to-indent ratios* J. of Mater Sci. Letters 1, 1982, 13

[5] **Raabe J., Bobryk E.**: *Wyznaczanie modułu Weibulla m i współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic} dla tworzyw ceramiki elektronicznej*; Materiały elektroniczne nr 3 (75), 1991

METHOD OF LIFE-TIME DETERMINATION FOR CERAMIC INSULATION MATERIALS

The mathematical model of life-time, based on the physical one of mechanical withstand of ceramic materials is given. The proposal of experimental procedure for evaluating the constant parameters in these model is described.