

PROGNOZOWANIE I DIAGNOZOWANIE STARZENIA KABLI W ELEKTROWNIACH JĄDROWYCH

Jacek Boguski, Grażyna Przybytniak

WSTĘP

Przewody i kable są istotnym elementem wszystkich elektrowni jądrowych, gdyż stanowią integralną część ich systemu sterowania i bezpieczeństwa. Szczególną uwagę przykładają się do kabli niskiego napięcia, tj. <1kV, zabezpieczających działanie przyrządów monitorujących pracę elektrowni. Około 61% tego typu kabli służy celom kontrolnym, 20% związanych jest z pracą różnego typu urządzeń, 5% stanowią kable komunikacyjne. Szacuje się, że w elektrowni jądrowej w otoczeniu jednego reaktora zainstalowanych jest ok. 1000 km różnego typu kabli. Aktualne wymogi bezpieczeństwa, jak również wysokie koszty operacji, nie pozwalają na wymianę kabli w czasie eksploatacji EJ przewidzianej obecnie na 40 - 60 lat. Dlatego przy projektowaniu EJ uwzględnia się czynniki środowiskowe na jakie narażone będą przewody elektryczne w czasie tak długiej eksploatacji, jak również przewiduje wszystkie możliwe nagłe niekorzystne zmiany warunków pracy będące skutkiem ewentualnych awarii.

W warunkach eksploatacyjnych działanie niekorzystnych czynników mających istotny wpływ na jakość kabli jest ograniczona do niektórych miejsc w EJ, tzw. „gorących punktów” (hot spots). Są one na ogół zlokalizowane wewnątrz węzłów technologicznych obsługujących reaktor. Wykaz przykładowych gorących punktów dla trzech powszechnie stosowanych typów reaktorów podano w Tabeli 1.

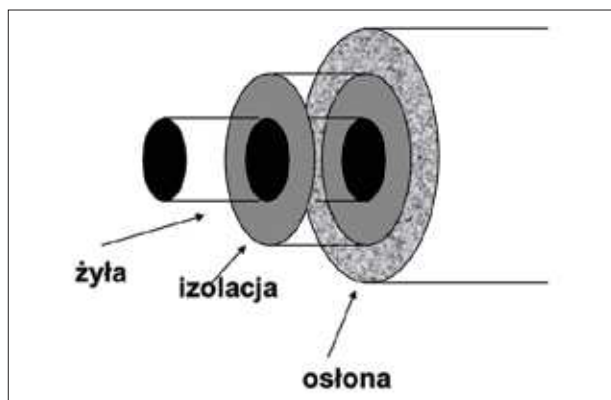
Obecnie w ramach Unii Europejskiej trwają intensywne prace nad stworzeniem jednolitej strategii kontroli jakości kabli stosowanych w elektrowniach jądrowych (EJ) oraz nad przewidywaniem zmian ich właściwości użytkowych. Planuje się m.in. porównanie różnych metod badawczych, opracowanie procedur testów przyspieszonego starzenia jak również stworzenie matematycznych modeli procesów degradacji izolacji i osłon kabli.

PROCESY STARZENIA KABLI

W elektrowniach jądrowych stosuje się różnego typu kable: jednożyłowe (rys. 1), wielożyłowe, osłonięte i nieosłonięte, zbrojone i osłonięte, ekranowane, czy współosiowe. Najczęściej ich izolacje i osłony wykonane są z kompozycji, których głównym składnikiem mogą być następujące polimery: sieciowane poliolefiny XLPO (zwłaszcza sieciowany polietylen XLPE), kopolimer etylenu i octanu winylu EVA, gumy etylenowo-propylenowe EPR, gumy silikonowe SiR, kopolimer etylenu i tetrafluoroetyleny ETFE, kopolimer etylen-propylen-dien EPDM, chlorosulfonowany polietylen CSPE jak również polichlorek winylu PVC (zwłaszcza w kablach starego typu). Obecnie stosowane są głównie tworzywa bezhalogenowe, które nie rozprzestrzeniają płomienia i nie wydzielają szkodliwych produktów gazowych, np.: chlorowodoru [1,2].

Tabela 1. Lokalizacja miejsc w EJ, w których kable są szczególnie narażone na starzenie [1]

Typ reaktora	Lokalizacja „gorącego punktu”	Temperatura/°C	Moc dawki/Gy*h ⁻¹
PWR	Pomieszczenie wytwornicy pary	47-48 (do 100)	0,1
	Obieg pierwotny	50	0,7
BWR	Rejon przewężenia suchej obudowy bezpieczeństwa	100 ± 5	0,5
	Rejon zaworu nadmiarowego układu pary świeżej	70 ± 5	0,01
	Obszar monitora strumienia neutronów w zakresie mocy	80 ± 5	0,24
CANDU	Szafa zasilająca i szyb reaktora	41-60	0,6 -2,1
	Obszar wytwarzania pary	30-60	0,0008-0,2



Rys. 1. Budowa kabla jednożyłowego

Tworzywa sztuczne wchodzące w skład kabli poddawane są w EJ działaniu niekorzystnych czynników, takich jak: podwyższone tło promieniowania jonizującego (*gamma*), podwyższona temperatura, wilgoć, ozon, kontakt z chemikaliami (oleje, smary), naprężenia mechaniczne, wibracje, itp. Długotrwałe działanie tych czynników, każdego z osobna albo kilku jednocześnie na tworzywa (często w tzw. efekcie synergetycznym) przyczynia się do wzrostu szybkości starzenia polegającego na zmianach zachodzących na poziomie molekularnym: powstawaniu produktów rodnikowych, pękaniu łańcuchów polimerowych, utlenianiu, sieciowaniu, a w konsekwencji prowadzących do ich degradacji przejawiającej się w pogorszeniu właściwości makroskopowych.

Ogólnie proces starzenia polimerów można podzielić ze względu na mechanizm na dwa rodzaje:

- Starzenie fizyczne: zachodzi na skutek migracji plastyfikatora, bądź jego odparowania pod wpływem podwyższonej temperatury. Ten mechanizm starzenia w znacznym stopniu zachodzi w PVC używanym w starszej generacji kablach instalowanych w EJ. Obserwowano również zjawisko migracji plastyfikatorów z izolacji do osłony.
- Starzenie chemiczne, na które składają się procesy prowadzące do pęknięcia łańcuchów polimerów, sieciowania i utleniania. W długiej perspektywie czasowej degradacja prowadzi do tworzenia nie występujących wcześniej w polimerze grup funkcyjnych zawierających atomy tlenu: grup karboksylowych, karbonylowych, hydroksylowych, nadtlenkowych.

CHARAKTERYSTYKA CZYNNIKÓW ŚRODOWISKOWYCH ODDZIAŁUJĄCYCH NA KABELE W ELEKTROWNIACH JĄDROWYCH

Uważa się, że największy udział w degradacji kabli mają czynniki termiczne. Powodują one niekorzystne zmiany strukturalne pogarszające właściwości mechaniczne i izolacyjne. Wartości temperatur w zależności od typu reaktora i lokalizacji kabla mogą wahać się od 30 do nawet ponad 100°C (Tabela 1).

Istotny udział w starzeniu kabli ma promieniowanie *gamma* towarzyszące przemianom jądrowym zachodzącym w reaktorze. Kabel poddany jego działaniu w jednym z „gorących punktów” ulega napromienowaniu w całej objętości, a równomierność pochłoniętej dawki zależy od energii promieniowania i geometrii kabla. Na ogół moce dawek, na które narażone są kable w EJ wynoszą średnio 0,1 Gy/h [3]. Tak więc w trakcie 40 - 60-letniej eksploatacji całkowita dawka pochłonięta przez kabel może sięgać od 30 do ponad 50 kGy.

Wilgoć jest czynnikiem, który ma istotny wpływ na właściwości elektryczne izolacji kabli, szczególnie tych układanych w kanałach. Degradacja pod wpływem wilgoci może zachodzić szczególnie intensywnie w kablach zawierających hydrofilowe napełniacze, np.: tlenek magnezu MgO [1,2]. Wilgoć przyczynia się do migracji napełniacza wewnątrz izolacji co skutkuje wahaniami oporności elektrycznej dodatkowo przyspieszającymi degradację. Ścisłe związane z obecnością wody lub wilgoci jest tzw. zjawisko *Watertreeing* prowadzące do charakterystycznej degradacji tworzyw sztucznych [4,5].

Występowanie ozonu w atmosferze przyczynia się do wzrostu ryzyka utleniania izolacji lub powłoki kabla. Szczególnie narażone na ten proces są kable, których izolacje i osłony zawierają w swoim składzie materiał z dużym udziałem wiązań podwójnych między atomami węgla np. w EPDM, gdzie istnieje możliwość bezpośredniej addycji cząsteczki ozonu. Może on powstawać jako produkt oddziaływania promieniowania jonizującego na tlen znajdujący się w powietrzu.

Obecność różnego rodzaju chemikaliów, zwłaszcza niepolarnych węglowodorów (smary, oleje) powoduje pęcznienie osłon i izolacji kabli, zwłaszcza w długim okresie eksploatacji i w podwyższonej temperaturze. Pęcznienie wpływa niekorzystnie na właściwości mechaniczne tworzyw. Ponadto w spęcznionym tworzywie zdecydowanie łatwiej zachodzi migracja różnego rodzaju niskocząsteczkowych dodatków (antyutlenia-czy, rantypirenów, plastyfikatorów), które pełnią kluczową rolę w utrzymaniu wysokiej jakości kabli.

Różnego rodzaju czynniki mechaniczne takie jak: wibracje, skręcenia, naprężenia, obciążenia w wielu

Tabela 2. Przepuszczalność, współczynnik dyfuzji i rozpuszczalność tlenu w XLPE [6]

Temperatura / °C	40	60	80
Przepuszczalność / kg m ⁻¹ h ⁻¹ atm ⁻¹	0,48 x 10 ⁻⁸	1,83 x 10 ⁻⁸	1,91 x 10 ⁻⁸
Współczynnik dyfuzji / m ² godz ⁻¹	36 x 10 ⁻⁸	83 x 10 ⁻⁸	144 x 10 ⁻⁸
Rozpuszczalność / kg m ⁻³ atm ⁻¹	0,0134	0,0134	0,0134

przypadkach mogą znacznie przyspieszyć degradujące działanie czynników wymienionych powyżej.

PRZYSPIESZONE STARZENIE KABLI

W warunkach laboratoryjnych przyspieszone starzenie prowadzi się w celu symulowania procesu degradacji tworzywa zachodzącego przez dziesiątki lat, w o wiele krótszym czasie i przy zintensyfikowanym oddziaływaniu czynników środowiskowych (promieniowanie *gamma*, wysoka temperatura). W efekcie tych działań zakłada się osiągnięcie takiego samego stopnia degradacji jak w warunkach rzeczywistych panujących w EJ. Iloraz wartości mocy dawki (Gy/h) zastosowanej w procesie przyspieszonego starzenia do mocy dawki spotykanej w czasie eksploatacji w EJ stanowi współczynnik przyspieszenia, natomiast całkowita dawka pochłonięta jest w obu przypadkach taka sama. W praktyce zaleca się, aby wartość współczynnika wynosiła nie więcej niż kilkaset [1,2]. Im większa wartość zastosowanego współczynnika, tym większe rozbieżności między faktycznym a założonym stopniem degradacji. Przy planowaniu warunków testu przyspieszonego starzenia należy uwzględnić wszystkie czynniki środowiskowe na jakie narażony jest kabel w czasie pracy.

DEGRADACJA OKSYDACYJNA

W świetle obecnego stanu wiedzy wydaje się, że starzenie w znacznym stopniu wynika z degradacji oksydacyjnej. Utlenianie materiału przy stosowaniu dużych mocy dawek promieniowania jonizującego często ograniczone jest szybkością dyfuzji tlenu. Oznaczono, że jeśli w trakcie przyspieszonego starzenia stosowana jest moc dawki 0,2 kGy/h, homogeniczna degradacja oksydacyjna zachodzi wyłącznie w 1 mm zewnętrznej warstwie polietylenu albo w 2,15 mm warstwie kopolimeru octanu winylu i etylenu. W głębszych warstwach utlenianie generowanych radiacyjnie rodników zachodzi w warunkach nierównowagowych. Dawkę absorpcyjną przy której następuje wyczerpanie tlenu początkowo rozpuszczonego w tworzywie można w przybliżeniu określić za pomocą następującego równania [6]:

$$D = S \times P \times 1,03 \times 10^{10} / G(-O_2)$$

Gdzie D – dawka pochłonięta (Gy), S - rozpuszczalność tlenu (moli g⁻¹ kPa⁻¹), P ciśnienie tlenu (kPa), G(-O₂) wydajność radiacyjna konsumpcji tlenu (/100eV).

Zwykle zakłada się, że ekspozycja przewodów elektrycznych na działanie promieniowania *gamma* nie przekracza 1 Gy/godz., zatem należy oczekiwać, że degradacja oksydacyjna zachodzi w warunkach równowagi z tlenem zawartym w próbce, a niedobór czynnika utleniającego jest możliwy jedynie w warunkach awaryjnych.

Tabela 2. przedstawia przepuszczalność, współczynnik dyfuzji i rozpuszczalność tlenu w usieciowanym polietylenie (XLPE) [7]. Podane wielkości odnoszą się wyłącznie do wybranego rodzaju PE, gdyż zależą one od stopnia krystaliczności polimeru, wielkości i struktury krystalitów, zawartości stabilizatorów i dodatków, itp.

TESTY SYMULOWANYCH AWARII (DBE)

Testy DBE (*design basis event*) polegają na odtworzeniu w laboratorium warunków odpowiadającym realnym stanom awaryjnym mogącym wystąpić w EJ. Zakładają one ekspozycję kabla na promieniowanie o mocy dawki od 1 do 10 kGy/h w temperaturze powyżej 70°C, poprzedzoną tzw. testami termodynamicznymi. Te ostatnie polegają na działaniu na kabel parą wodną pod wysokim ciśnieniem. Test ten projektowany jest w oparciu o specyficzne warunki w EJ i wykonywany jest w oparciu o założony profil temperaturowo-ciśnieniowy pary wodnej w funkcji czasu postulowany dla wielu rodzajów awarii, np.: LOCA (*loss of coolant accident*), MSLB (*main steam line break*). Niejednokrotnie w DBE uwzględniane jest dodatkowo przyspieszone starzenie mające na celu zasymulowanie działania czynników środowiskowych utrzymujących się na podwyższonym poziomie po wystąpieniu awarii (*post-DBA test*) [1,2].

RÓŻNICE MIĘDZY NATURALNYM I PRZYSPIESZONYM STARZENIEM KABLI

Główną przyczyną występowania różnic w efektach starzenia w warunkach typowych dla eksploatacji w EJ i starzenia przyspieszonego jest odmienny mechanizm

procesu degradacji. Jak wcześniej zaznaczono, proces utleniania istotny dla przebiegu starzenia często limitowany jest szybkością dyfuzji tlenu do materiału polimerowego z którego wykonana jest izolacja czy osłona kabla. Zintensyfikowanie dawek promieniowania *gamma* może sprawić, że degradacja oksydacyjna będzie przebiegać niehomogenicznie i kabel nie będzie stanowił reprezentatywnej próbki dla testów. Ponadto istnieje ryzyko, że zastosowanie zbyt wysokiej temperatury spowoduje wejście w obszar, gdzie mechanizm przyspieszonego starzenia będzie inny niż ten, który zachodzi w warunkach niezakłóconej eksploatacji. Generalnie stwierdzono, że oddziaływanie promieniowania jonizującego *gamma* poprzedzone działaniem podwyższonej temperatury skutkuje dalej posuniętą degradacją izolacji i osłony kabli niż działanie tych samych czynników środowiskowych w odwrotnej kolejności (synergia). Ponadto zaobserwowano, że naprzemienna degradacja radiacyjno-termiczna usieciowanych poliolefin powoduje w polimerach cykliczne wzrosty i spadki parametrów charakteryzujących proces starzenia. Stwierdzono, że w temperaturze otoczenia dla niektórych polimerów starzenie spowodowane degradacją radiacyjną zachodzi szybciej niż w temperaturze podwyższonej [8].

Przeprowadzono również badania polegające na napromieniowaniu badanego materiału w środowisku wodnym w temperaturach 40, 60 i 80°C. Wyniki wykazały spadek stopnia degradacji w przypadku najwyższej temperatury. Zatem okazuje się, że skutki wywołane czynnikami termicznymi i radiacyjnymi nie zawsze kumulują się, lecz mogą się niekiedy częściowo znosić [7]. Powyższe efekty zwykle wyjaśnia się biorąc pod uwagę zjawiska relaksacji makrocząstek tworzywa, która umożliwia w podwyższonych temperaturach rekombinację rodników i wzrost usieciowania polimeru.

W celu zbadania wpływu stosowania różnych współczynników przyspieszenia na wiarygodność uzyskiwanych wyników w testach laboratoryjnych, w 1985 r. zaplanowano w USA zakrojony na szeroką skalę eksperyment. Umieszczono w 15 EJ pakiety (w sumie sześć tysięcy próbek) składające się z różnego typu kabli układu sterowania i kabli układu bezpieczeństwa [9]. W eksperymencie, którego czas trwania planowany jest na 40 lat, w regularnych odstępach czasu pobierane są próbki różnego typu materiałów izolacyjnych i powłok zewnętrznych, a ich właściwości porównywane są z identycznymi próbkami podawanymi przyspieszonemu starzeniu. We wszystkich zbadanych dotąd próbkach (po 20 latach) stwierdzono występowanie pewnych korelacji między niektórymi wskaźnikami degradacji, jednakże zależności te różniły się co do zakresów występowania dla kabli starzonych naturalnie i sztucznie.

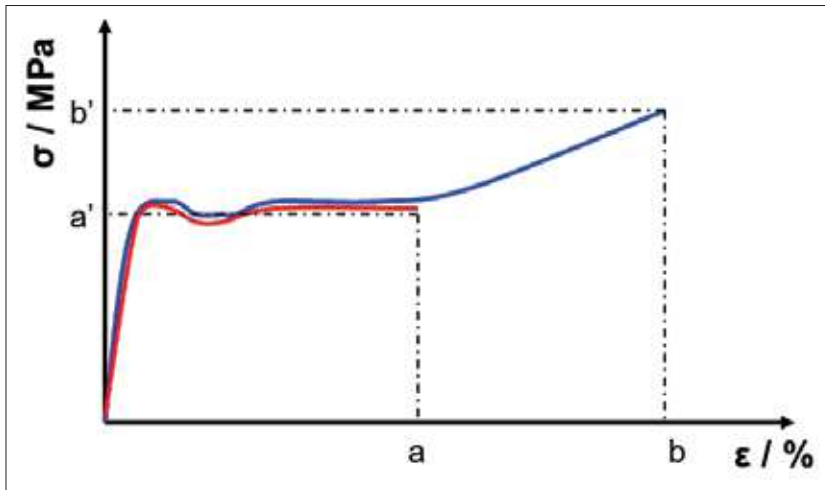
Te wstępne wyniki dowodzą jak trudnym zadaniem jest określenie kwalifikowanych warunków czy też kwalifikowanego okresu eksploatacji za pomocą stosowanych obecnie metod przyspieszonego starzenia.

WSKAŹNIKI STANU JAKOŚCI KABLI I METODY ICH POMIARÓW

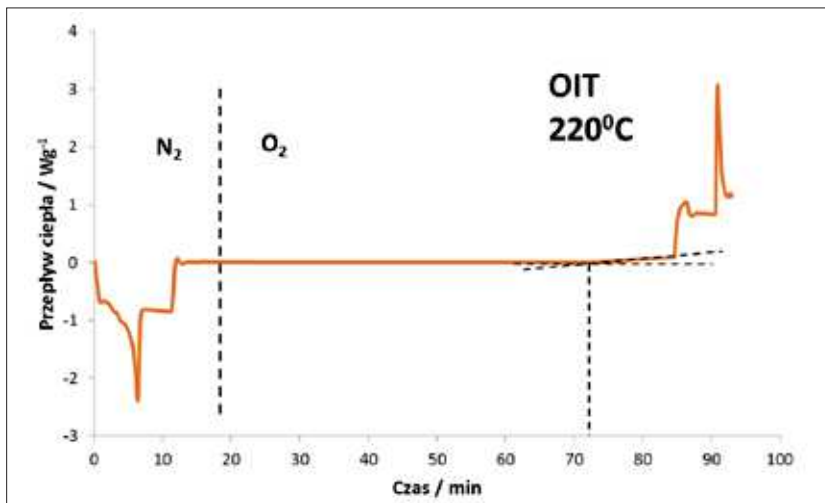
Do określenia kwalifikowanych warunków eksploatacji kabli, jak również do bieżącego monitoringu ich jakości, stosuje się mierzalne wielkości fizykochemiczne stanowiące wskaźniki stanu jakości kabli. Parametry te zmieniają się w zależności od stopnia degradacji i często można wyznaczyć pomiędzy nimi korelacje. Ogólnie wskaźniki można podzielić na związane z właściwościami chemicznymi (ciężar cząsteczkowy, gęstość, frakcja żelowa, stopień nienasylenia, zawartość antyutleniaczy i stabilizatorów, indeks tlenowy) gdzie zazwyczaj do pomiarów stosuje się mikropróbki (poniżej jednego grama); właściwościami mechanicznymi (wytrzymałość na zerwanie, wydłużenie przy zerwaniu oraz naprężenie przy zerwaniu, wskaźnik twardości); właściwościami elektrycznymi (oporność izolacji, napięcie przebicia). Poniżej przedstawiono charakterystykę najważniejszych wskaźników wraz z metodami ich pomiarów [1,2].

WYDŁUŻENIE PRZY ZERWANIU

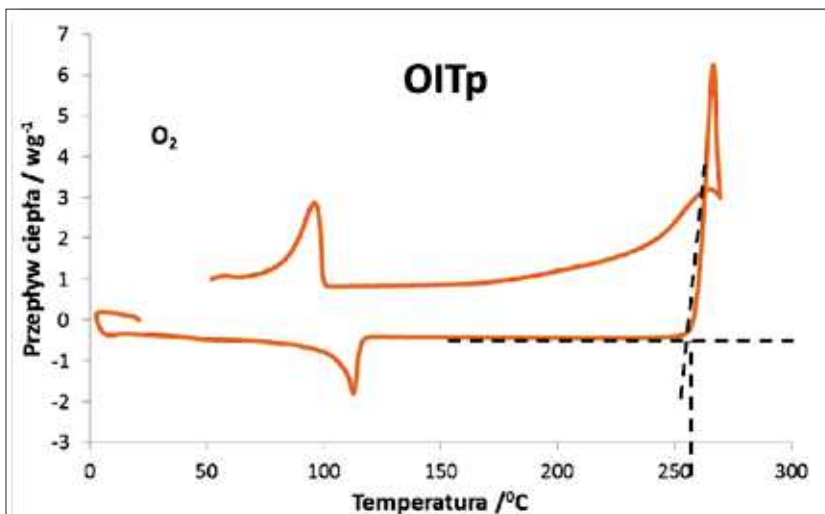
Jest to jeden z najważniejszych wskaźników monitorujących jakość izolacji i osłon kabli [10]. Z wykresu uzyskanego w trakcie rozciągania kształtek tworzyw o standaryzowanych wymiarach można odczytać wartość naprężenia przy zerwaniu oraz wydłużenia przy zerwaniu (rys. 2). Ta ostatnia wartość uznawana jest za reprezentatywny i czuły wskaźnik stanu degradacji tworzywa. Przyjęto, że redukcja wydłużenia izolacji przy zerwaniu o 50% w stosunku do wartości pierwotnej (dla kabla nie starzonego) stanowi kryterium awarii kabla i jest równoznaczna z wyeliminowaniem go z dalszej eksploatacji [1,2]. Wskaźnik ten posiada jednakże pewne wady. Staje się on mało reprezentatywny w przypadku rozciągania kształtek wykonanych z usieciowanych poliolefin (XLPO), gdyż w tego typu tworzywach czułość wskaźnika w funkcji stopnia degradacji jest niska. Bieżące monitorowanie starzenia kabla nie jest w tym przypadku możliwe ze względu na skokowy charakter zmiany wydłużenia dopiero w momencie osiągnięcia znacznego pogorszenia jakości kabla. Ponadto do pomiarów wytrzymałości na rozciąganie wymagane są stosunkowo duże rozmiary próbek. Często kompozycje



Rys. 2. Zależność naprężenia σ w funkcji wydłużenia ϵ charakterystyczna dla próbek polimerowych. b oznacza początkowe wydłużenie przy zerwaniu, a – wydłużenie po starzeniu. Spadek współczynnika $a/b \cdot 100\%$ poniżej 50% oznacza wykluczenie kabla z dalszego użytkowania.



Rys. 3. Wyznaczanie OIT na przykładzie folii PE w temperaturze 220°C, OIT = 58,32 min



Rys. 4. Wyznaczanie OITp na przykładzie folii PE, OITp = 258°C. Pomiar w atmosferze tlenu

tworzyw zawierające do kilkunastu składników (polimery, uniepalniacze, wypełniacze, stabilizatory, pigmenty, itp.) może cechować niejednorodność struktury, co przejawia się w znacznym rozrzucie uzyskanych wyników. Zatem, w celu uzyskania wiarygodnych danych, konieczne jest zbadanie dużej ilości próbek i przeprowadzenie ich analizy statystycznej.

CZAS INDUKCJI UTLENIANIA OIT

Wskaźnik OIT (oxidative induction time) określa czas potrzebny do rozpoczęcia reakcji utleniania w warunkach stałej temperatury w strumieniu tlenu (rys. 3).

OIT stanowi powtarzalną i bezpośrednią metodę wiarygodnego oszacowania stanu zaawansowania utlenienia izolacji kabla [11]. Może on również służyć jako miara zużycia antyutleniacza w procesie starzenia. Pomiar OIT wymaga standaryzacji [12], a jego wynik zależy od temperatury izotermicznego wygrzewania próbki. Ze względu na niewielką masę próbki potrzebną do badań (ok. 15mg), wskaźnik ten jest wygodny do oceny degradacji oksydacyjnej kabli. Pomiar czasu indukcji utleniania dokonywany jest metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej DSC (differential scanning calorimetry) [13]. Badana próbka ogrzewana jest według ustalonego wcześniej profilu w atmosferze gazu obojętnego (azotu), a następnie tlenu, gdy osiągnięta zostanie zakładana temperatura pomiaru. OIT oznacza czas jaki upływa pomiędzy przełączeniem gazów a gwałtownym wzrostem na krzywej termogramu przypisywanym tzw. pikowi utleniania. Temperatura pomiaru OIT jest wyższa od temperatury topnienia polimeru, jednak powinna być na tyle niska, aby wartość OIT była nie krótsza niż 10 min.

TEMPERATURA INDUKCJI UTLENIANIA OITP

Wskaźnik OITp mierzony jest w analogiczny sposób jak OIT z tą różnicą, że pomiar dokonywany jest w warunkach dynamicznych, przy stałym wzroście temperatury od 0 do 300°C w atmosferze tlenu (rys. 4). Dla większości tworzyw kablowych zakres ten jest wystarczający do zainicjowania reakcji utleniania. Sygnał odpowiadający temperaturze indukcji utleniania jest wyraźny, a jego wartość jest zwykle nie mniejsza niż 0,5 W/g. OITp może z powodzeniem zastąpić OIT jako wskaźnik jakości izolacji i osłon kabli, zwłaszcza gdy izoterma utleniania w pomiarze OIT jest trudna do zaobserwowania bądź gdy jego wartości są zbyt niskie (<10min).

GĘSTOŚĆ

Niekiedy dogodnym wskaźnikiem stanu jakości kabli jest pomiar gęstości. Zaobserwowano, że dla wielu tworzyw sztucznych gęstość wzrasta wraz ze stopniem degradacji. Przyczyną jest kurczenie się sieci polimerowej na skutek sieciowania oraz zamiany atomów wodoru na atomy tlenu w procesie degradacji oksydacyjnej. W przypadku PVC zachodzi również proces wypacania plastyfikatora powodujący zmniejszenie odległości między łańcuchami polimeru [1,2]. Dla polimerów semikrystalicznych za zwiększenie gęstości odpowiada wzrost zawartości fazy krystalicznej, której objętość molowa jest mniejsza niż fazy amorficznej. W przeciwieństwie do pomiarów właściwości mechanicznych, oznaczenia gęstości są szybsze, prostsze i wymagają znacznie mniejszych objętości próbek, podobnie jak pomiary OIT. Zwykle wyniki obu stosowanych zamiennie technik pomiarowych są porównywalne, a znalezione korelacje umożliwiają stosowanie jednej, dostępnej metody. Jednakże w przypadku kabli zawierających w swym składzie dużą ilość napelnaczy nieorganicznych zmiany gęstości w matrycy polimerowej mogą zawierać się w granicach błędu pomiaru, co wyklucza zastosowanie tej metody do monitorowania procesu starzenia.

FRAKCJA ŻELOWA I EKSTRAKCJA ANTYUTLENIACZY

W procesach degradacji oksydacyjnej wywołanej starzeniem radiacyjnym i termicznym dochodzi do szeregu reakcji rodnikowych, których jedną z konsekwencji jest pękanie łańcuchów makrocząstek polimeru. Wśród kabli używanych w energetyce jądrowej

czołowe miejsce zajmują te izolowane usieciowanymi poliolefinami, zwłaszcza usieciowanym polietylenem XLPE. Produktami degradacji sieci są fragmenty łańcuchów o mniejszym ciężarze cząsteczkowym i znacznej ruchliwości segmentów łańcucha. Powyższe zjawiska wpływają na rozpuszczalność polimeru w wybranych wrzących rozpuszczalnikach organicznych zwykle zmniejszając zawartość nierozpuszczonej pozostałości, tj. frakcji żelowej, która może być miernikiem postępu degradacji.

Z technicznego punktu widzenia dokładnie w ten sam sposób można prowadzić ekstrakcję niskocząsteczkowych dodatków takich jak stabilizatory czy antyutleniacze [14], jak również ewentualnych produktów ich rozkładu. Pomiar ubytku antyutleniacza (jego stężenia w ekstrakcie) wraz z postępującą degradacją stanowi ważną informację na temat starzenia kabli, którą jak wspomniano wcześniej można skorelować z wartością OIT, zwłaszcza gdy użyto tzw. antyutleniaczy fenolowych.

TEORETYCZNE PRZEWIDYWANIE CZASU EKSPLOATACJI KABLI

Teoretyczne przewidywania okresu użytkowania danego polimeru opierają się na ekstrapolacji zależności wynikającej z równania Arrheniusa lub jego pół-empirycznych pochodnych. Przy takim podejściu obliczenia prowadzi się w odniesieniu do zmian zachodzących w podwyższonej temperaturze, co ma odzwierciedlać tzw. przyspieszone starzenie termiczne. Do badań kinetycznych stosuje się, tak jak w przypadku reakcji chemicznych zależność wiążącą parametry kinetyczne reakcji degradacji z temperaturą:

$$k = K \exp(-\Delta E/RT)$$

gdzie: k – stała szybkości reakcji, K – współczynnik przedwykładniczy, ΔE – energia aktywacji, R – stała gazowa, T – temperatura w skali bezwzględnej.

Parametry kinetyczne są w dużej mierze wielkościami empirycznymi, których wartości wyznacza się odpowiednimi metodami eksperymentalnymi. Jeśli zmiany w danym polimerze spełniają równanie Arrheniusa, to istnieje liniowa zależność pomiędzy logarytmem rejestrowanych w funkcji czasu zmian a odwrotnością temperatury; nachylenie prostej zależy od ΔE . Stosowanie powyższego modelu wymaga następujących założeń:

- rodzaj i liczba defektów w materiale nie zależy od temperatury,
- mechanizm procesów chemicznych odpowiedzialnych za starzenie nie zależy od temperatury, a wtedy również ΔE jest niezależne od temperatury.

Przyjęcie wymienionych kryteriów *a priori* wiąże się z ryzykiem popełnienia istotnego błędu, ponieważ równanie jest spełnione tylko w rzadkich przypadkach. W wielu badaniach stwierdzono, że w niskich temperaturach ΔE przyjmuje mniejsze wartości, niż w wyższych [15], zatem ekstrapolacja danych uzyskanych w wysokich temperaturach do temperatur niższych (eksploatacyjnych) powodować może znaczne niedoszacowanie skali procesu degradacji.

METODY KWALIFIKACJI CZASU EKSPLOATACJI KABLI

W planowaniu i opracowywaniu testów przyspieszonego starzenia kabli dla EJ często przeprowadza się szereg czynności, które zawierają się w następujących ogólnie zdefiniowanych działaniach [1,2]:

- Kwalifikacja środowiskowa czyli działanie mające na celu określenie wszelkich czynników środowiskowych na jakie narażony będzie kabel podczas swojej eksploatacji. Może być prowadzona według ogólnych, opisanych w normach metod, bądź według lokalnych procedur przyjętych w danej elektrowni jądrowej.
- Wstępna kwalifikacja (*type testing*) przeprowadzana jest dla kabli przed ich instalacją w EJ i służy do opracowania założeń przewidywanego czasu użytkowania bądź określenia optymalnych warunków pracy, przy których dany kabel zachowa swoje właściwości i na podstawie których możliwe będzie określenie czasu, po którym jakość kabla będzie ciągle zadowalająca.
- Kwalifikowany okres użytkowania to okres, w trakcie którego kabel pracujący w danych warunkach eksploatacyjnych (czynniki środowiskowe) ulega procesom starzenia, które nie powodują pogorszenia wybranych właściwości kabla poniżej określonego kryterium.
- Kwalifikowane warunki stanowią opis czynników środowiskowych wyrażonych poprzez mierzalne wielkości fizykochemiczne, przekładających się na wskaźniki definiujące stan kabla. Kabel pracujący w tych warunkach utrzymuje swoją jakość na zadowalającym poziomie.

W celu przeprowadzenia kwalifikacji prognozowanego okresu użytkowania kabla poddaje się go przyspieszonemu starzeniu a następnie bada się określone wskaźniki, np.: wydłużenie przy zerwaniu, aż do momentu gdy ich wartość osiągnie poziom wskazujący na stan niedostatecznej jakości kabla. Duże współczynniki przyspieszenia wprowadzają wysoki stopień niepew-

ności kwalifikowanego czasu eksploatacji w danych warunkach. Znane są przypadki testowania kilku różnych materiałów izolacyjnych w krótkim czasie (duże wartości współczynników przyspieszenia), z których część nie sprostала wymaganiom następnym kwalifikacji tzw. testów symulowanej awarii (*DBE – Design Basis Event*) po zastosowaniu napromieniowania dawką znacznie mniejszą od przewidywanej. W związku z powyższym, w celu zredukowania poziomu niepewności przeprowadza się następujące działania:

- Założenie początkowe krótkiego okresu użytkowania (10 – 15 lat) jako wstępna kwalifikacja.
- Rozszerzanie okresu kwalifikacji na podstawie testów starzeniowych i planowanych testów DBE, poprzez ich powtarzanie pod koniec wstępnie założonego okresu użytkowania.

Przed upływem wstępnie założonego okresu użytkowania pobierane próbki kabli poddawane są przyspieszonemu starzeniu z użyciem znacznie mniejszych wartości współczynników przyspieszenia niż w przypadku wstępnej kwalifikacji, jak również poddawane są testom DBE. W testach tych zakłada się przewidywany okres użytkowania. Po otrzymaniu zadowalających wartości wskaźników stanu jakości kabla po przyspieszonym starzeniu, kwalifikowany okres użytkowania zostaje rozszerzony o założoną wartość. Przed upływem przedłużonego czasu planuje się kolejne testy starzeniowe z odpowiednimi założeniami. Czynności te powtarzane są do momentu stwierdzenia braku możliwości przedłużania kwalifikowanego okresu ze względu na zbyt zaawansowany proces degradacji kabla i prawdopodobieństwo wystąpienia awarii. Powyższe działania ograniczają się do nowobudowanych EJ lub starych, gdzie z różnych przyczyn zdecydowano się na częściową wymianę instalacji, np.: w celu usunięcia kabli izolowanych PVC. W przypadku nowych EJ umieszcza się próbki tzw. „świadka”, tj. odcinków kabli, które będą służyły monitorowaniu starzenia materiałów polimerowych w „gorących punktach” EJ. Pomimo dużego zasobu próbek należy brać pod uwagę, że do wielu badań, np.: wydłużenia przy zerwaniu, potrzebne są dość długie odcinki kabli. Obecnie zaleca się wykorzystywanie istniejących, jak i poszukiwanie nowych metod badań fizykochemicznych, o ile to możliwe nieinwazyjnych i reprezentatywnych, dla określenia stopnia zaawansowania procesu starzenia kabli. Jest to konieczne ze względu na fakt, iż pobieranie próbek z kabli pracujących w już istniejących EJ jest dozwolone jedynie w USA i to wyłącznie z osłon [16, 17].

PODSUMOWANIE

Dyskusja dotycząca wdrożenia energetyki jądrowej bez wyczerpującej analizy wszelkich kwestii bezpieczeństwa jest niepełna. Jak wcześniej podkreślono, systemy bezpieczeństwa każdej elektrowni jądrowej działają m.in. dzięki różnego rodzaju przewodom i kablom średniego i niskiego napięcia, od których zależą takie funkcje jak transmisja danych czy sterowanie. Każdy system bezpieczeństwa jest na tyle niezawodny na ile niezawodne jest jego najsłabsze ogniwo. Odporność radiacyjna i termiczna tworzyw sztucznych stosowanych w izolacjach i osłonach kabli jest mała w porównaniu z odpornością innych materiałów używanych w EJ, dlatego też niezbędna jest wnikliwa analiza zjawisk zachodzących w polimerach narażonych na działanie niekorzystnych czynników środowiskowych. Konieczne jest opracowanie modelu, za pomocą którego możliwe byłoby przewidywanie czasu eksploatacji kabli (kwalifikacja użytkowa) z uwzględnieniem wszelkich istotnych zmiennych w funkcji czasu. Drogą do osiągnięcia tego celu jest wyjaśnienie mechanizmów degradacji kabli i ich analiza w kontekście różnic pomiędzy testami przyspieszonego starzenia a degradacją w warunkach panujących w EJ.

W Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej realizowany jest w ramach 7 PR projekt „Ageing Diagnostics and Prognostics of low-voltage I&C cables” - akronim ADVANCE, 2011-2013, koordynator Electricité de France, który uzyskał finansowanie w konkursie Fission-2010-2.1.1: „Ageing of non-metallic NPP components”.

prof. IChTJ. dr inż. Grażyna Przybytniak,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa

mgr inż. Jacek Boguski,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa

Literatura:

- [1] *Assessment and management of aging of major nuclear power plants components important to safety: In-containment instrumentation and control cables IAEA TECDOC 1188*, 2000.
- [2] *Assessing and managing cable ageing in nuclear power plants: IAEA Nuclear Energy Series*, No. NP-T-3.6; 2012
- [3] Bartoniczek B. i in., *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* 151, 423, 1999.
- [4] Acudo M. i in., *Journal of Electrostatic*, 53, 267-294, 2001.
- [5] Chonung K. i in., *Polym. Degrad. Stab.* 92, 537-544, 2007.
- [6] Clought R.L. i in., *J. Polym. Sci., Polym. Chem. Edition*, Vol. 23, 362, 1985.
- [7] Matsui T. i in., *Radiat. Phys. Chem.* 63, 193, 2002.
- [8] Celina M. i in., *Radiat. Phys. Chem.* 48, 613, 1996.
- [9] Gillen K.T. i in., *Polym. Degrad. Stab.* 71, 15, 2001.
- [10] Gillen K.T. i in., *Polym. Degrad. Stab.* 91, 2146, 2006.
- [11] Placek V. i in. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* 208, 448, 2003.
- [12] EN 728:1997.
- [13] Przygocki W., *Metody Fizyczne Badań Polimerów*, str. 218, wyd. PWN, 1990.
- [14] Pielichowski J., Puszyński A., *Technologia Tworzyw Sztucznych*, str. 284, wyd. NT, 2003.
- [15] Yagi T. i in., *Cable Industries Review* 84, 11, 1992.
- [16] Gillen K.T. i in., *Radiat. Phys. Chem.* 56, 429, 1999.
- [17] Casa J.V. i in., *Polym. Degrad. Stab.* 87, 77, 2005.