

KONTROLOWANIE DEGRADACJI KABLI I PRZEWODÓW ELEKTRYCZNYCH W ELEKTROWNIACH JĄDROWYCH

Controlling the degradation of electric wires and cables in nuclear power plants

Grażyna Przybytniak, Jarosław Sadło, Marta Walo

Streszczenie: Przewody i kable elektryczne są istotnymi elementami systemów zapewniających stabilną i bezpieczną pracę reaktorów jądrowych. Każda jednostka elektrowni jądrowej wymaga ok. 1500 km różnego typu kabli, które nie są przeznaczone do wymiany w czasie eksploatacji reaktora przewidywanej na 40-60 lat, pomimo degradujących warunków panujących w obudowie bezpieczeństwa, na które składają się: podwyższona wilgotność i temperatura, promieniowanie gamma, występowanie ozonu czy naprężenia mechaniczne. Ponieważ w takim otoczeniu izolacje i osłony wykonane z kompozycji polimerowych ulegają szybkiemu starzeniu, potrzebne są niezawodne metody umożliwiające zarówno monitorowanie postępu procesu degradacji, jak i oszacowania okresu bezpiecznego użytkowania kabli w przyszłości. Dotychczas ich kwalifikacja opiera się na testach mechanicznych, jednak obecnie rozważane są i stopniowo wdrażane nowe, dogodniejsze oraz dostatecznie czułe metody diagnostyczne.

Abstract: Electric cables and wires are one of the critical elements of the systems ensuring stable and safe operation of nuclear reactors. Each unit of nuclear power plant requires about 1500 km of different types of cables, which during operational lifetime of reactors estimated at 40-60 years, are not intended to be replaced, despite degrading conditions in the containment building consisting of elevated temperature and humidity, gamma radiation, ozone, mechanical stress, etc. Because in such an atmosphere insulations and sheath made of polymer composites age relatively quickly, the reliable methods are required to monitor the progress of the destructive process and to determine the period of safe use of cables in the future. So far, their qualification has been based on mechanical tests, however nowadays new, convenient and sufficiently sensitive methods are considered and implemented.

Słowa Kluczowe: kable i przewody, degradacja, kwalifikacja, elektrownia jądrowa

Keywords: cables and wires, degradation, qualification, nuclear power plant

Wstęp

Czas życia obecnie działających elektrowni jądrowych (EJ) będzie wydłużony z 40 lat do 60, a nawet 80 lat, lecz wyłącznie w przypadku, jeśli zagwarantowana zostanie ich dalsza bezpieczna eksploatacja. Bezawaryjna praca elektrowni jądrowej wymaga prawidłowego działania ogromnej liczby urządzeń elektrycznych połączonych w różnorodne systemy [1-3]. Kable i przewody elektryczne uznawane są za jeden z podstawowych elementów zapewniających niezawodną i bezawaryjną pracę reaktorów. Ich średnia liczba w jednej jednostce energetycznej sięga 25 000, natomiast całkowita długość szacowana jest na 1,5 tys. km. W związku z powyższym wszystkie organizacje międzynarodowe związane z energią jądrową, jak również użytkownicy jądrowych bloków energetycznych, doceniają istotność właściwego przeprowadzania kwalifikacji kabli, monitorowania warunków, w jakich są one użytkowane oraz skutecznego zarządzania starzeniem, zarówno w czasie normalnej pracy elektrowni, jak i w sytuacjach awaryjnych. Działania te wpisują się w dyrektywę dotyczącą bezpieczeństwa jądrowego (Council Directive 2014/87/

EURATOM; 2014), która stwierdza, że należy nadać najwyższy priorytet bezpieczeństwu jądrowemu na każdym etapie eksploatacji EJ.

Izolacje i osłony kabli wykonane są z różnego rodzaju tworzyw sztucznych podatnych na starzenie, zatem należy stosować do ich wytwarzania takie polimery, które nawet w obecności dużego natężenia czynników degradujących zapewnią niezawodne sterowanie reaktorem, w szczególności w przypadku awarii, i związanej z tym koniecznością jego bezpiecznego wyłączenia. Jakość systemów elektrycznych ma kluczowe znaczenie, gdyż zarówno najnowsze zasady bezpieczeństwa, jak i względy ekonomiczne wskazują, że wymiana okablowania w trakcie użytkowania EJ może zachodzić jedynie w stanie wyższej konieczności.

Starzenie przewodów i kabli

Ostatnie badania nad starzeniem radiacyjnym i termicznym kabli wykazały ograniczoną przydatność obecnie stosowanych technik, za pomocą których monitoruje się postęp starzenia izolacji i osłon, jak również ocenia okres bezpiecznego ich użytkowania w elektrowniach

jądrowych [4,5]. Zastrzeżenia budzą również badania destrukcji polimerów w oparciu o tzw. przyspieszone starzenie, kiedy to materiał poddawany jest działaniu czynników degradujących o natężeniu znacznie przekraczającym ich poziom w warunkach typowych dla otoczenia reaktora. W konsekwencji tego typu procedury nie zapewniają właściwej reprezentatywności wyników. Podczas powolnego starzenia procesy zachodzące w równowadze z otoczeniem w obudowie bezpieczeństwa mają zwykle charakter degradacji oksydacyjnej [6,7]. Jej skutki nie pokrywają się z efektami obserwowanymi w trakcie zintensyfikowanego starzenia, kiedy to dostępność tlenu dla reakcji chemicznych inicjowanych radiacyjnie bądź termicznie jest ograniczona.

Operatorzy reaktorów jądrowych przyjmują zwykle przybliżone modele matematyczne procesu starzenia. W takim przypadku nie jest w pełni uwzględniana struktura tworzyw sztucznych, z których wykonane są izolacje i osłony. Poza matrycą polimerową zawierają one bowiem antyutleniacze, stabilizatory, środki ograniczające palność, pigmenty/barwniki, sadzę itp. wpływające na mechanizm degradacji i jej szybkość [8].

Zachodzi zatem pilna potrzeba opracowania nowego, wielowymiarowego podejścia do problemu kontrolowania starzenia kabli i wiarygodnego przewidywania czasu ich bezpiecznej eksploatacji, w którym mogą one we właściwy sposób spełniać swoje funkcje w systemach sterowniczych i pomiarowych, instalacjach przeciwpożarowych, systemach kontroli bezpieczeństwa itd. Układy elektryczne elektrowni jądrowej muszą zapewniać zachowanie wysokich standardów niezawodności, pomimo że mogą być one narażone na ekspozycję na ekstremalne czynniki degradujące, takie jak wysoka temperatura otoczenia, promieniowanie jonizujące, duża wilgotność powietrza, ozon, jak również drgania i naprężenia mechaniczne [9,10].

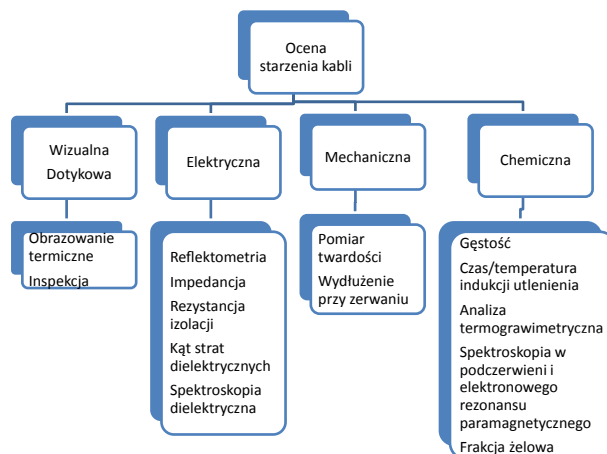
Kwalifikacja

Wszystkie urządzenia i układy elektrowni jądrowej istotne dla zachowania bezpieczeństwa muszą być poddane kwalifikacji, biorąc pod uwagę pełnione przez nie funkcje i znaczenie dla prawidłowej pracy reaktora. Poza istotnością danego elementu dla bezpieczeństwa bierze się pod uwagę skutki wynikające z jego awarii, czas, w którym musi on nadal właściwie spełniać swoją rolę w przypadku awarii jądrowej, czy częstość użycia danego systemu dla potrzeb bezpieczeństwa [11,12]. Dlatego dostawca urządzeń i jego podzespołów, w tym przewodów i kabli, jest zobowiązany udowodnić, że dostarczone produkty wykazują zakładaną niezawodność. Każde urządzenie musi spełniać wymagane dla danej klasy bezpieczeństwa kryteria związane z jego odpornością na obciążenia eksploatacyjne i awarie. W procesie kwalifikacji urządzenie poddawane jest obciążeniami przekraczającym typowe warunki pracy reaktora, jak również obciążeniami awaryjnym. Wymagania dotyczące kwalifikowania urządzeń niezbędnych dla zachowania bezpieczeństwa w elektrowniach jądrowych zwykle formułowane są w oparciu o w normę IEEE 323 [13].

Wysoka trwałość kabli jest szczególnie istotna, jeśli są one zainstalowane w tzw. gorących punktach (ang. *hot spots*), w których natężenie czynników degradujących jest szczególnie duże. Np. dla reaktora wodnego ciśnieniowego PWR (ang. *Pressurized Water Reactor*) jest to otoczenie wytwornic pary i obiegu pierwotnego, a dla reaktora wodnego wrzącego BWR (ang. *Boiling Water Reactor*) – przewężenie obudowy bezpieczeństwa i obszar zaworu nadmiarowego węża technologicznego układu świeżej pary. Poza odpornością na działanie niekorzystnych czynników termicznych i radiacyjnych kable powinny wykazywać podwyższoną wytrzymałość w przypadku kontaktu z płomieniem. W obudowie bezpieczeństwa stosowane są kable ogniodopusne i bezhalogenowe, tj. nie emitują trujących substancji, o ograniczonej emisji dymów w przypadku pożaru, oraz nierozprzestrzeniające płomienia.

Metody diagnostyczne

Poniższy schemat przedstawia techniki badawcze, które mogą być stosowane do oceny zaawansowania stopnia degradacji izolacji i osłony kabla [14].



Rys. 1. Schemat technik badawczych stosowanych do oceny zaawansowania stopnia degradacji izolacji i osłony kabla

Fig. 1. Diagram of research techniques used to assess the degree of degradation of insulation and cable sheath

Ocena wizualna jest metodą nieniszczącą, pozwalającą na identyfikację pęknięć osłony, odbarwień, stwierdzenie obecności zanieczyszczeń powierzchni kabla chemikaliami bądź olejami oraz zlokalizowanie innych uszkodzeń miejscowych, takich jak pęcznienie czy deformacja. Poza tą rutynowo stosowaną jakościową oceną stanu okablowania zwykle kontroluje się parametry otoczenia wpływające na szybkość starzenia, głównie moc dawki pochłoniętej i temperaturę. Natomiast dzięki termografii w podczerwieni można określić „gorące punkty” wewnątrz lub wokół instalacji elektrycznych. Jednak metody te mogą znaleźć zastosowanie wyłącznie w stosunku do łatwo dostępnych fragmentów kabli usytuowanych poza kanałami instalacyjnymi.

Techniki opierające się na pomiarach elektrycznych mogą być stosowane, jeśli wraz z postępem starzenia wybrany parametr elektryczny wykazuje odchylenie od stanu pierwotnego [14,15].

Reflektometria w dziedzinie czasu TDR (ang. *time-domain reflectometry*) i w dziedzinie częstotliwości FDR (ang. *frequency domain reflectometry*) znajdują zastosowanie do wyznaczenia odległości od różnego rodzaju uszkodzeń w liniach kablowych oraz nieciągłości lub zaburzeń impedancji, co umożliwi kontrolę integralności systemu elektrycznego poprzez identyfikację i lokalizację usterek.

Pomiar impedancji prądu zmiennego generuje sygnał prądowy o różnych częstotliwościach między parą przewodów w obwodzie elektrycznym. Dzięki pomiarowi indukcyjności, pojemności i rezystancji LCR (ang. *inductance, capacitance and resistance*) możliwe jest diagnozowanie stanu okablowania. Niespodziewanie niskie lub wysokie impedancje wskazują na degradację kabli, wadliwe połączenia lub usterki fizyczne. Nieprawidłowe wskazania pojemności zwykle świadczą o mechanicznym uszkodzeniu izolacji.

Pomiar rezystancji izolacji IR (ang. *insulation resistance*) dostarcza informacji o jakości kabli i ich połączeń oraz o odbiorniku końcowym. Znając napięcie przyłożone między przewodem zasilającym a uziemieniem oraz prąd upływu można wyznaczyć rezystancję. Dane zwykle analizuje się jako stosunek rezystancji do dwóch różnych przedziałów czasowych, wyznaczając współczynnik absorpcji dielektrycznej DAR (ang. *dielectric absorption ratio*), współczynnik polaryzacji PR (ang. *polarization ratio*) i wskaźnik polaryzacji PI (ang. *polarization index*). Na wyniki wpływają warunki otoczenia, tj. temperatura i wilgotność względna. Pomiar wykonuje się zwykle w trakcie testów symulowanych awarii DBE (ang. *design basis event* czy *LOCA*; ang. *loss of coolant accident*).

Za pomocą oznaczenia parametru tangensa kąta strat dielektrycznych TD (ang. *tan delta*) udaje się rozpoznać i zmierzyć integralne skutki postępującej degradacji kabli, co czyni je dogodnym narzędziem do monitorowania jakości izolacji. Jej wartość jest funkcją częstotliwości.

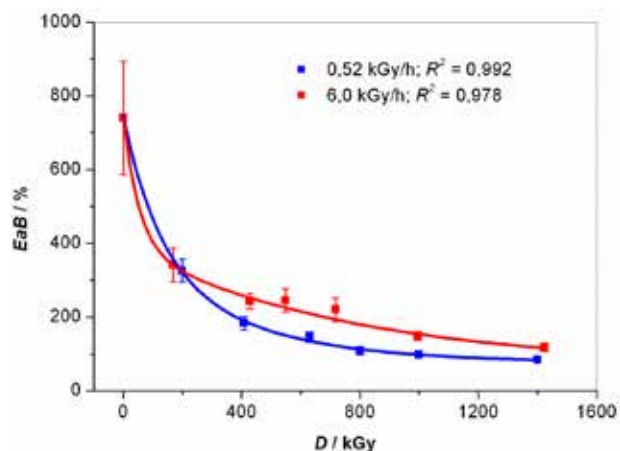
Spektroskopia dielektryczna DS. (ang. *dielectric spectroscopy*) to metoda badawcza bazująca na reakcji materiału na przyłożone pole elektryczne. Prąd elektryczny przepływający przez próbkę zmienia się w zależności od częstotliwości zmiennego pola elektrycznego. W teście wykorzystywane jest oddziaływanie pola elektrycznego z momentem dipolowym i ładunkiem materiału. Interpolacja uzyskanego widma dielektrycznego dostarcza informacji o strukturze i zmianach w analizowanym materiale.

Dotychczasowe próby zastosowania na większą skalę pomiarów elektrycznych jako kryterium oceny stanu kabli w elektrowniach jądrowych nie powiodły. Na oznaczenia duży wpływ mają warunki zewnętrzne oraz połączenia kabli z przyrządem pomiarowym, co wpływa na różnice w wynikach testów przeprowadzonych przez różne laboratoria. Stwierdzono również niewystarczającą ich czułość. Jednak niewątpliwie metody elektryczne po przezwyciężeniu powyższych trudności i opracowaniu odpowiednich procedur będą

miały w przyszłości istotne znaczenie, gdyż są technikami nieniszczącymi, w wielu przypadkach nie wymagają pobierania próbek, a ponadto pozwalają ocenić stan izolacji na całej długości kabla, nie zaś lokalnie, jak w przypadku metod chemicznych i mechanicznych.

Badania mechaniczne są rutynowo stosowane w EJ do kwalifikacji kabli [13,16,17]. Spadek względnego wydłużenia przy zerwaniu EaB (ang. *elongation at break*) o ponad 50% w większości przypadków uznawany jest za kryterium eliminujące kabel z dalszego użycia. Metoda jest powszechnie stosowana, gdyż nie wymaga skomplikowanego oprzyrządowania, a maszyna do badań wytrzymałościowych jest szeroko dostępna i prosta w obsłudze. Jednak testy wykazują szereg minusów, z których najważniejsze to:

- (1) konieczność wykonywania kilku pomiarów w celu zminimalizowania błędów i statystycznej obróbki wyników,
- (2) niedogodności związane z pobieraniem próbek w postaci wiósełek (ewentualnie pasków) z izolacji/osłon, których kształt zawsze ma postać walca,
- (3) trudności w pozyskiwaniu materiału do badań. Ostatni z wymienionych problemów znajduje rozwiązanie poprzez pobieranie próbek:
 - z kabli, które aktualnie ulegają wymianie w EJ,
 - z tzw. depozytów, tj. kabli, które są układane w sąsiedztwie instalacji elektrycznej i podlegają starzeniu w identycznych warunkach,
 - z materiałów poddanych przyspieszonemu starzeniu w warunkach laboratoryjnych.



Rys. 2. Zmiany wydłużenia przy zerwaniu (EaB / %) w funkcji dawki pochłoniętej (D / kGy) dla osłony EPR starzonej promieniowaniem gamma z wykorzystaniem dwóch mocy dawek: 6,0 kGy/h i 0,52 kGy/h [18]

Fig. 2. Changes in elongation at break (EaB / %) as a function of absorbed dose (D / kGy) for EPR sheath affected by gamma radiation using two dose rates: 6.0 kGy / h and 0.52 kGy / h [18]

Wydłużenie przy zerwaniu stanowi dotychczas podstawowy test oceny jakości kabli, dlatego wyniki badań wykonywanych innymi technikami są korelowane wartościami EaB. Rys. 2. ilustruje przykładowe zmiany parametru w funkcji dawki pochłoniętej dla osłony kabla przedstawionego na fot. 1.

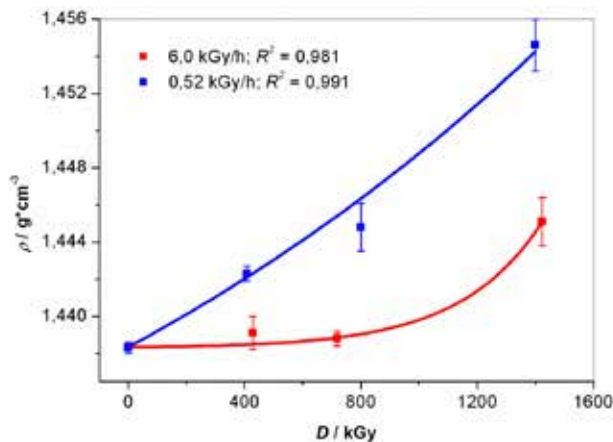


Fot. 1. Kabel średnionapięciowy. Osłona wykonana z gumy etylenowo-propylenowej (EPR) wypełnionej w 60% wodorotlenkiem glinu ($Al(OH)_3$) pełniącym funkcję opóźniacza palenia [18]

Photo 1. Medium voltage cable. Sheath made of ethylene-propylene rubber (EPR) filled with 60% aluminum hydroxide ($Al(OH)_3$) acting as a flame retardant [18]

System monitorujący starzenie polimerów za pomocą pomiaru twardości materiału z wykorzystaniem węgelnika IM (ang. *indenter module*) jest przenośny, poręczny i nieniszczący. Pomiar twardości obliczany jest na podstawie zależności siły od odkształcenia materiału polimerowego powstającego w wyniku wciskania węgelnika ze stałą prędkością. Zalecane parametry pomiaru zawarte są w normie w IEC/IEEE 60780-323 [13].

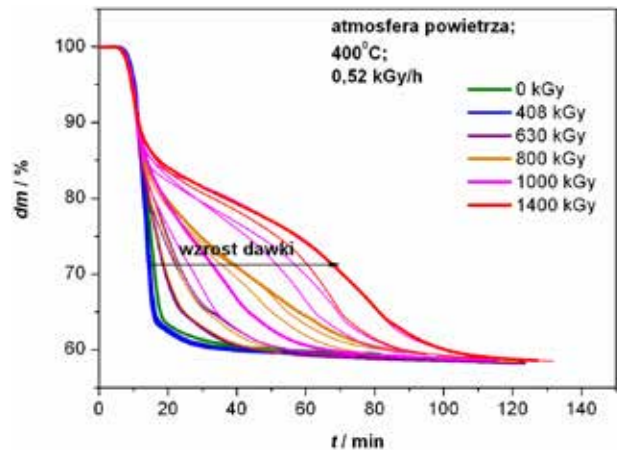
Do diagnostyki postępu starzenia można również stosować szeroką gamę metod termicznych i fizykochemicznych.



Rys. 3. Zmiany gęstości (ρ / $g \cdot cm^{-3}$) w funkcji dawki pochłoniętej (D / kGy) osłony EPR starzonej promieniowaniem gamma z wykorzystaniem dwóch mocy dawek: 6,0 kGy/h i ISSL 0,52 kGy/h [18]

Fig. 3. Changes in density (ρ / $g \cdot cm^{-3}$) as a function of the absorbed dose (D / kGy) of EPR sheath affected by gamma radiation using two dose rates: 6.0 kGy/h and ISSL 0.52 kGy/h [18]

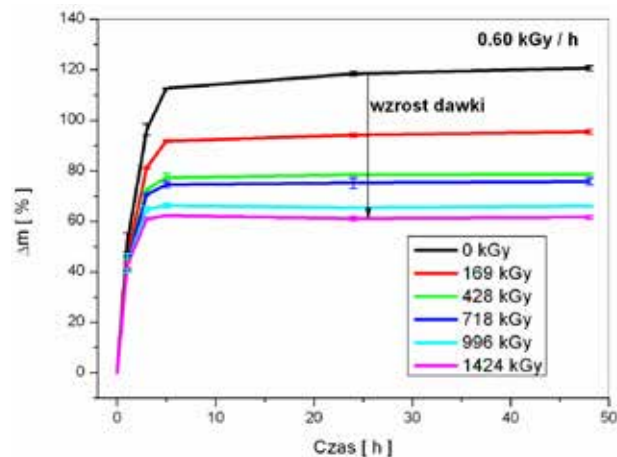
Pomiar gęstości materiału jest prostą metodą dostarczającą informacji o stopniu zaawansowania procesu starzenia związanego z degradacją oksydacyjną materiału. W jej wyniku gęstość polimeru wzrasta, a obserwowany efekt, po skorelowaniu z EaB, może być pomocny w procesie kwalifikacji kabli, rys. 3.



Rys. 4. Zestawienie termogramów TGA osłony EPR przedstawiające spadek masy (dm / %) w funkcji czasu (t / min) w atmosferze powietrza rejestrowanych w 400 °C dla próbek odniesienia i po starzeniu promieniowaniem gamma o mocy dawki 0,52 kGy/h [18]

Fig. 4. Series of TGA thermograms of EPR sheaths showing mass decrease (dm / %) as a function of time (t / min) in air atmosphere recorded at 400 °C for reference samples and after gamma radiation aged with a dose rate of 0.52 kGy/h [18]

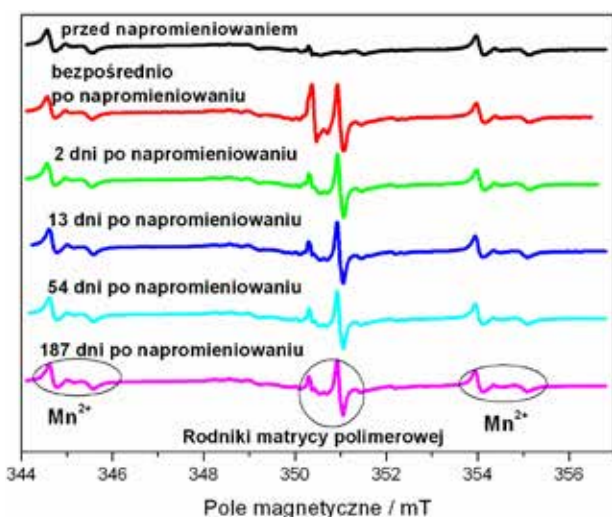
Analiza termogravimetryczna TGA (ang. *thermogravimetric analysis*) umożliwia oznaczanie zmian mas próbek przy zadanej szybkości wzrostu temperatury albo w warunkach izotermicznych. W wariancie pierwszym różnice w termogramach materiałów wyjściowych i starzonych są zwykle nieznaczne [19,20]. Natomiast na podstawie badań prowadzonych w Instytucie Chemii i Techniki Jądrowej stwierdzono, że rozkład niektórych polimerów w stałej temperaturze (np. w 400°C), w szczególności w atmosferze powietrza, zmienia się wraz z postępowaniem degradacji oksydacyjnej. Wydłużenie czasu termicznego rozkładu może służyć jako dogodny wskaźnik monitorowania tego procesu, co przedstawiono na rys. 4.



Rys. 5. Zestawienie zależności stopnia spęcznienia (Δm / %) w funkcji czasu (t / h) dla osłony EPR poddanej starzeniu promieniowaniem gamma o mocy dawki 0,6 kGy/h [18]

Fig. 5. Comparison of the degree of swelling (Δm / %) as a function of time (t / h) for the EPR sheaths aged by gamma radiation with a dose rate of 0.6 kGy/h [18]

Oznaczenie frakcji żelowej GF (ang. *gel fraction*) pozwala na oszacowanie wydajności procesu pękania wiązań kowalencyjnych w łańcuchach polimerów. W wielu przypadkach izolacje i osłony wykonane są z polimerów sieciowanych chemicznie. Wraz z pogłębiającym się procesem degradacji, wielkość frakcji żelowej maleje w wyniku destrukcji trójwymiarowej sieci utworzonej przez makrocząsteczki. Stwierdzono również redukcję współczynnika pochłaniania rozpuszczalnika SUF (ang. *solvent uptake factor*). Zjawisko to jest związane z tworzeniem polarnych grup funkcyjnych zawierających tlen, które nie sprzyjają procesowi dyfuzji niepolarnego rozpuszczalnika. Zależność stopnia spęcznienia za pomocą ksyleny od dawki pochłoniętej dla osłony kabla przedstawia rys. 5.



Rys. 6. Zestawienie widm ESR dla osłony EPR przed i po napromieniowaniu dawką ok. 18 kGy przy mocy dawki 6,0 kGy/h [18]

Fig. 6. Series of ESR spectra for EPR sheath before and after irradiation with a dose of approx. 18 kGy at a dose rate of 6.0 kGy/h [18]

Chociaż za pomocą metod spektroskopowych, np. ESR (ang. *electron spin resonance*), FTIR (ang. *Fourier-transform infrared spectroscopy*) czy NIR (ang. *Near-infrared spectroscopy*), można ocenić procesy chemiczne inicjowane termicznie bądź radiacyjnie, jednak analiza ich widm nie wystarcza, aby ilościowo oznaczyć, jak daleko posunięty jest proces degradacji. Mogą one jednak służyć do poznania mechanizmów reakcji odpowiedzialnych za pogarszanie się jakości izolacji i osłon wykonanych z polimerów [7,18]. Spektroskopia ESR daje wgląd w procesy rodnikowe inicjowane radiacyjnie, które stanowią pierwszy etap degradacji polimerów, rys. 6.

Czas indukcji utlenienia OIT (ang. *oxidation induction time*) wyznacza się ogrzewając próbkę materiału w atmosferze azotu do wybranej temperatury, a następnie przetrzymuje się ją w atmosferze tlenu w warunkach izotermicznych, aż do osiągnięcia egzotermicznego efektu cieplnego związanego z utlenianiem. OTI jest definiowane jako przedział czasu, jaki upłynął pomiędzy wprowadzeniem atmosfery tlenowej a osiągnięciem izotermii utleniania. OIT maleje wraz z pogłębiającą się degradacją polimeru pozostającego w równowadze z tlenem

atmosferycznym oraz zużywaniem się antyutleniaczy i stabilizatorów obecnych w tworzywie.

Opracowywanie nowych kryteriów

Konieczność podejmowania badań w celu opracowania nowych metod diagnozowania kabli wynika nie tylko z wydłużonego czasu eksploatacji EJ, lecz również w związku z instalowaniem nowego typu reaktorów, stosowaniem nowej generacji kabli wykonanych z innowacyjnych materiałów polimerowych czy wdrażaniem do praktyki przemysłowej nowych technik instrumentalnych [17].

Należy oczekiwać, że wyniki tych prac umożliwią:

- stosowanie naukowo potwierdzonych i znormalizowanych podejść do przewidywania czasu bezpiecznego użytkowania kabli [12],
- uwzględnienie w procesie ich starzenia informacji dotyczących budowy kabli i składu tworzyw sztucznych, z których wykonane są izolacje i osłony [8],
- ocenę wpływu różnorodnych czynników degradujących i skutków ich równoczesnego działania na polimery,
- zaproponowanie nieniszczących technik monitorowania kabli oraz opracowanie niezawodnych kryteriów wskazujących na konieczność ich wymiany.

Takie instrumenty i metody badawcze pozwoliłyby operatorom EJ na bezpieczne przedłużenie czasu eksploatacji reaktorów II i III generacji, a tym samym przyczyniłyby się do zrównoważonego rozwoju energetyki wykorzystującej EJ jako bezemisyjne źródło energii.

Komisja Europejska wspiera powyższe działania w ramach projektów EURATOM. Instytut Chemii i Techniki Jądrowej w latach 2011-2014 uczestniczył w projekcie „**Diagnozowanie i prognozowanie starzenia kabli niskiego napięcia**” (2055/7.PR-EURATOM/2011/2), natomiast od 2017 do 2022 r. jest partnerem konsorcjum realizującego projekt „**Europejskie narzędzia i metodologie dla efektywnego zarządzania starzeniem kabli w elektrowniach jądrowych**” (3781/H2020-Euratom/2017/2). W obu projektach funkcję koordynatora powierzono Electricité de France (EdF).

Podsumowanie

Dyskutowane w kraju wdrożenie energetyki jądrowej pociąga za sobą konieczność opracowania własnych przepisów w zakresie monitorowania stanu okablowania, prognozowania czasu jego bezpiecznej eksploatacji oraz przeprowadzania kwalifikacji [16,17]. Powyższe zagadnienia wymagają analizy rodzajów kabli i przewodów stosowanych w obudowie reaktora oraz materiałów polimerowych, z których są one wykonane.

Wybór typu reaktora ma kluczowe znaczenie dla przewidywanego średniego natężenia czynników degradujących w warunkach eksploatacyjnych oraz

w czasie wypadku jądrowego, jak również dla zlokalizowania miejsc podwyższonego ryzyka. Na tej podstawie należy sporządzić plan rozmieszczenia depozytów kabli oraz opracować profil ich przyspieszonego starzenia w warunkach laboratoryjnych symulujących awarię. Powyższe działania są niezbędne dla oceny prognozowanego czasu bezpiecznego użytkowania kabli z wykorzystaniem optymalnych metod diagnostycznych oceniających zaawansowanie procesu degradacji. Konieczne jest również sformułowanie wytycznych dla aktów normatywnych regulujących sposób przeprowadzenia ich kwalifikacji. Obecnie nie ma w Unii Europejskiej zharmonizowanych przepisów dotyczących tych kwestii. Francja i Niemcy opracowały w tym zakresie własne standardy, które tak jak w innych krajach europejskich, opierają się na normach obowiązujących w USA – IEC 60780 i IEEE 323. W roku 2016 ukazał się ujednoczony dokument IEC/IEEE 60780-323 „Nuclear facilities – Electrical equipment important to safety Systems – Qualification” [13]. Jest on poświęcony różnym metodom kwalifikacji urządzeń elektrycznych, w tym przewodów i kabli, oraz określa wymagania jakie muszą one spełniać. Poza tradycyjnym testem bazującym na pomiarze EaB zawiera on wskazówki dotyczące metod eksperymentalnych wykorzystujących badania czasu indukcji utlenienia, pomiaru twardości, reflektometrii w dziedzinie czasu i rezystancji izolacji.

Praca naukowa finansowana ze środków finansowych na naukę w latach 2017-2022 przyznanych na realizację projektu międzynarodowego współfinansowanego oraz projektu H2020, Euratom Research and Training Programme, grant nr 755183.

*dr hab. Grażyna Przybytniak, prof. IChTJ
dr Jarosław Sadło,
dr Marta Walo,
Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa*

Literatura:

- [1] IAEA Safety Standard Series, Safety of Nuclear Power Plants: Design, Requirements No. NS-R-1, IAEA, Vienna 2000.
- [2] IAEA Safety Standard Series, Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-1.2, IAEA, Vienna 2001
- [3] IAEA Safety Standard Series, Maintenance, Surveillance and In-service Inspection in Nuclear Power Plants, Safety Guide No. NS-G-2.6, IAEA, Vienna 2002
- [4] V. Placek, T. Kohout “Comparison of cable ageing” *Radiat. Phys. Chem.* 79 (2010) 371–374
- [5] M. Celina, K.T. Gillen, R.A. Assink, Accelerated aging and lifetime prediction: Review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes. *Polym. Deg. Stab.* 90 (2005) 395-404
- [6] V. Placek, B. Bartonicek, The dose rate effect and the homogeneity of radio-oxidation of plastics. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B* 185 (2001) 355-359
- [7] M. Rodriguez-Vazquez, Ch. M. Liauw, N. S. Allen, M. Edge, E. Fontan, Degradation and stabilisation of poly(ethylene-stat-vinyl acetate): Spectroscopic and rheological examination of the thermal and thermo-oxidative degradation mechanisms. *Polym. Degrad. Stability* 91 (2006) 154-164
- [8] J. Boguski, G. Przybytniak, K. Mirkowski: Model studies on phenolic antioxidant role in radiation- and thermally-induced accelerated degradation of electrical cable insulation. *Nukl.*, 57 (2012) 485-489
- [9] T. Seguchi, K. Tamura, T. Ohshima, A. Shimada, H. Kudoh, Degradation mechanisms of cable insulation materials during radiation- thermal ageing in radiation environment. *Radiat. Phys. Chem.* 80 (2011) 268–273
- [10] S. Ilie, R. Setnescu, E.M. Lungulescu, V. Marinescu, D. Ilie, T. Setnescu, G. Mares, Investigations of a mechanically failed cable insulation used in indoor conditions. *Polym. Testing* 30 (2011) 173–182
- [11] T. Kenneth, G. R. Assink, R. Bernstein, M. Celina, Condition monitoring methods applied to degradation of chloro-sulfonated polyethylene cable jacketing materials *Polym. Deg. Stab.* 91 (2006) 1273-1288
- [12] „Część Elektryczna Elektrowni Jądrowej” J. Nowicki, Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Warszawa, 2017.
- [13] IEC 60780-323-2016 - IEC/IEEE International Standard - Nuclear facilities - Electrical equipment important to safety - Qualification
- [14] Benchmark analysis for condition monitoring test techniques of aged low voltage cables in nuclear power plants IAEA-TECDOC-1825, Vienna, 2017
- [15] J.-F. Chailan, G. Boiteux, J. Chauchard, B. Pinel, G. Seytre, Effects of thermal degradation on the viscoelastic and dielectric properties of chlorosulfonated polyethylene (CSPE) compounds. *Polym. Deg. Stab.* 48 (1995) 61-65
- [16] M. Ito T. Oka, Y. Hama, Evaluation of time accelerated irradiation method of elastomer by modulus–ultimate elongation profile. *Radiat. Phys. Chem.* 78 (2009) 1081–1084
- [17] IAEA Nuclear Energy Series Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants, No. NP-T-3.6, Vienna 2012
- [18] Dobór kryteriów oceny degradacji radiacyjnej i termicznej kabli. Rozprawa doktorska J. Boguski, Warszawa, 2015.
- [19] J. Boguski, G. Przybytniak, K. Łyczko, New monitoring by thermogravimetry for radiation degradation of EVA. *Radiat. Phys. Chem.* 100 (2014) 49–53
- [20] G. Przybytniak, J. Boguski, V. Placek, L. Verardi, D. Fabiani, E. Linde, U. W. Gedde Inverse effect in simultaneous thermal and radiation aging of EVA insulation *EXPRESS Polym. Let.* 9 (2015) 384–393