

Gliwice, 6.02.2013 r.

Prof. dr hab. inż. Marian Urbańczyk
Katedra Optoelektroniki
Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej
ul. B. Krzywoustego 2
44-100 Gliwice

Recenzja

rozprawy habilitacyjnej
pt. „*Procesy starzeniowe w ceramice elektrotechnicznej*”
i dorobku naukowego dr Przemysława Ranachowskiego

Wstęp

Recenzowana monografia dr. Przemysława Ranachowskiego wchodzi tematycznie w zakres inżynierii materiałowej i dotyczy badania procesów starzeniowych w ceramice elektrotechnicznej metodą mechanoakustyczną, w połączeniu z metodą ultradźwiękową oraz optyczną. Mimo licznych osiągnięć w technologii wytwarzania ceramiki elektrotechnicznej, stosowanej w konstrukcji izolatorów w sieciach elektroenergetycznych, problemy właściwej oceny zachodzących procesów starzeniowych w wyniku stopniowej degradacji tworzywa i predykcji czasu życia izolatorów są w dalszym ciągu ważnym zagadnieniem dla służb zapewniających niezawodność w dostarczaniu energii elektrycznej. Ceramika stosowana do wytwarzania izolatorów powinna spełniać wysokie wymagania w zakresie obciążalności mechanicznej, wytrzymałości dielektrycznej oraz odporności na warunki zabrudzeniowe. Wymagany czas życia izolatorów powinien przekraczać 30, a nawet 50 lat. Niestety, nawet niewielkie odstępstwa w technologii wytwarzania, niewłaściwy dobór materiałów składowych ceramiki oraz naprężenia mechaniczne – wewnętrzne i zewnętrzne są powodem rozwijających się procesów starzeniowych i w konsekwencji skrócenia czasu eksploatacji izolatorów. Ten aspekt ma duże znaczenie techniczne i ekonomiczne. Niespodziewane awarie izolacji lub osprzętu na liniach elektroenergetycznych średnich, wysokich i najwyższych napięć nie zapewniają ciągłości dostaw energii elektrycznej i są powodem dużych strat ekonomicznych dla zakładów eksploatujących linie przesyłowe. Obciążenia mechaniczne izolatorów mogą być obciążeniami rozciągającymi, zginającymi lub skręcającymi, mogą być obciążeniami statycznymi, ale także szczególnie istotnymi - dynamicznymi. Czynniki te są głównym powodem rozwoju procesów starzeniowych w ceramice elektrotechnicznej. Narażenia elektryczne mają znacznie mniejsze znaczenie dla żywotności izolatorów. Wydaje się, że istotne znaczenie mogą mieć narażenia zabrudzeniowe, w szczególności wpływ wilgoci przenikającej do wnętrza izolatora w miejscach odsłoniętych przez szkliwo lub niezabezpieczonych szklivem. Stosowane do oceny jakości izolatorów metody konwencjonalne, opisane w normach przedmiotowych jako próby typu, badania wyrobu oraz badania kontrolno-odbiorcze, oparte m.in. o próby doraźnej wytrzymałości mechanicznej, próby termiczne i nasiąkliwości oraz badania ultradźwiękowe połączenia okucia z rdzeniem izolatora i próby na napięcie przebicia nie pozwalają na ocenę przewidywanego czasu życia izolatora. Służą one w zasadzie dopuszczeniu izolatora do stosowania.

Znaczny ciężar izolatorów ceramicznych, szczególnie stosowanych w liniach najwyższych napięć, spowodował rozwój badań nad konstrukcjami izolatorów kompozytowych i hybrydowych. Pierwsze izolatory kompozytowe z kloszami z żywicy epoksydowej i rdzeniem z włókna szklanego opracowano i wykonano w firmie General Electric w 1959 roku. Mimo rozwoju i udoskonalenia konstrukcji tych izolatorów, poprzez wprowadzenie nowych materiałów polimerowych, niezawodność izolatorów kompozytowych była niewielka. Dopiero wprowadzenie w latach 70. i 80. u.w. nowych materiałów, opartych m.in. o elastomery silikonowe oraz elastomery usieciowane EPDM jako materiały osłonowe, spowodował znaczący wzrost zastosowania izolatorów kompozytowych w budowie linii elektroenergetycznych najwyższych napięć. Niemniej, izolatory ceramiczne nie straciły na znaczeniu.

Podstawowym zagadnieniem w badaniu i ocenie jakości izolatorów ceramicznych jest opracowanie metod badawczych, które w krótkim czasie, w badaniach laboratoryjnych, pozwolą na symulację długoczasowych procesów starzeniowych zachodzących w warunkach eksploatacyjnych. Rozprawa habilitacyjna dr Przemysława Ranachowskiego uzupełnia tę lukę. Habilitant zaproponował autorską, oryginalną metodę mechanoakustyczną, skojarzoną z badaniami ultradźwiękowymi i optycznymi próbek pobranych z izolatorów z eksploatacji i specjalnie przygotowanych w warunkach laboratoryjnych do badania procesów starzeniowych w ceramice. Metoda ta umożliwiła ocenę odporności na procesy starzeniowe i pośrednio - czasu życia izolatorów ceramicznych na podstawie krótkotrwałych badań laboratoryjnych próbek tworzywa izolatora.

Wyniki prac doświadczalnych dr Przemysława Ranachowskiego zostały zawarte w przedstawionej do recenzji monografii.

1. Recenzja rozprawy habilitacyjnej

Rozprawa dr Przemysława Ranachowskiego opublikowana w Pracach IPPT PAN nr 2, 2011r., napisana na 261 stronach, składa się z dwunastu rozdziałów i obszernego spisu literatury. Spis literatury zawiera 215 pozycji, w tym 31 pozycji, w których dr Przemysław Ranachowski jest autorem lub współautorem. W rozprawie autor przedstawił własne osiągnięcia w zakresie badań procesów starzeniowych w ceramice elektrotechnicznej.

We wstępie do pracy (rozdział 1) autor przedstawił ogólne informacje dotyczące właściwości ceramiki elektrotechnicznej. Celem rozprawy (rozdział 2) były kompleksowe badania procesów degradacji porcelanowych tworzyw elektrotechnicznych oraz materiału korundowego. Zasadniczym celem było określenie możliwości zastosowania autorskiej, oryginalnej metody mechanoakustycznej, uzupełnionej pomiarami parametrów propagacji fal ultradźwiękowych w badanych materiałach, w połączeniu z analizą mikroskopową zglądów tworzywa próbek do badania procesów starzeniowych. Istotnym elementem pracy było wzbogacenie wiedzy dotyczącej procesów starzeniowych w porcelanie wysokoglinowej C 130. Brak obserwacji efektów degradacji po dłuższym okresie eksploatacji tego rodzaju ceramiki wynika stąd, że tworzywo to zostało wprowadzone do produkcji izolatorów stosunkowo niedawno, w latach 90. u.w. i w związku z tym niewielkie są doświadczenia eksploatacyjne. Ponadto, zamiarem autora było badanie procesów starzeniowych ceramik pochodzących od różnych wytwórców, gdyż spodziewał się słusznie, że na procesy starzeniowe może mieć wpływ budowa strukturalna ceramiki, ściśle uzależniona od surowców i stosowanej technologii wytwarzania. Wśród zadań, które autor postawił do rozwiązania było ustalenie efektywności działania fazy mulitowej we wszystkich rodzajach tworzyw porcelanowych. Niezwykle ważnym zagadnieniem

było zbadanie wpływu obecności ziaren kwarcu i dodatków stłuczki na wytrzymałość mechaniczną ceramiki, w szczególności na wytrzymałość długotrwałą. Tego rodzaju badania były już wcześniej prowadzone tylko dla klasycznych porcelan krzemionkowych. Istotnym zagadnieniem postawionym przez autora rozprawy była próba oceny roli matrycy szklistej oraz porowatości struktury ceramiki w procesach starzeniowych.

W rozdziale trzecim autor przedstawił stan wiedzy w zakresie procesów starzeniowych w porcelanie elektrotechnicznej, omówił różnego rodzaju defekty w materiałach ceramicznych, wpływ okresowych zmian temperatury otoczenia na awaryjność izolatorów, przedstawił zagadnienia związane z krótkotrwałą i długotrwałą wytrzymałością mechaniczną ceramiki. Ważne, z punktu widzenia praktyki stosowania izolatorów ceramicznych, są przedstawione w rozprawie teorie wzmocnienia porcelany – teoria mulitowa, wzmocnienia matrycy oraz wzmocnienia dyspersyjnego. Rozdział ten umiejscawia zagadnienia, którymi zajmuje się habilitant, na tle ogólnej wiedzy dotyczącej zjawisk zachodzących w materiałach ceramicznych.

Zasadniczym rozdziałem w pracy jest rozdział czwarty, w którym autor przedstawił opracowaną przez siebie, a następnie zastosowaną w badaniach procesów starzeniowych w materiałach ceramicznych metodę mechanoakustyczną. Metoda ta polega na badaniu zmian struktury ceramiki podczas działania powoli narastającego obciążenia ściskającego próbkę. W trakcie eksperymentu mechanicznego rejestrowane jest zmieniające się obciążenie mechaniczne z jednoczesną rejestracją sygnałów emisji akustycznej. Autor analizuje użycie różnych deskryptorów emisji akustycznej: liczbę zliczeń i tempo zliczeń, liczbę zdarzeń i tempo zdarzeń, wartość szczytową mocy sygnału oraz wartość skuteczną sygnału. Autor słusznie podkreśla, że wybór określonych deskryptorów emisji akustycznej jest problemem ważnym dla właściwej interpretacji otrzymanych wyników pomiarów. Wybór ten uzależniony jest od rodzaju badanego tworzywa ceramicznego, jedne tworzywa ceramiczne są źródłem krótkich sygnałów o niskiej energii, inne wytwarzają sygnały o dużej energii. Autor w swoich badaniach najczęściej stosował takie deskryptory jak tempo zdarzeń i energia zdarzeń. Pomiar emisji akustycznej umożliwia śledzenie procesów dynamicznych zachodzących w ceramice podczas jej obciążania mechanicznego, przy czym sygnały te pojawiają się już przy naprężeniach progowych, przy których nie jest możliwe wykrycie powstających mikropęknięć innymi metodami. Metoda ta jest przydatna zarówno do badań małych próbek, jak i dużych izolatorów. Procesy degradacji ceramiki są głównym źródłem sygnałów emisji akustycznej. Badania wykazały liniową zależność pomiędzy prędkością wzrostu szczeliny mikropęknięcia a tempem emisji akustycznej. Tę właściwość emisji akustycznej autor wykorzystał do śledzenia procesów rozwoju mikropęknięć w ceramice. Autor wykorzystuje teoretyczny związek między tempem emisji akustycznej i prędkością wzrostu mikropęknięć, a także ze zmianami współczynnika intensywności naprężeń. Na wartość tempa emisji akustycznej ma wpływ także struktura ceramiki, a w szczególności średnia wielkość ziaren.

W badaniach mechanoakustycznych procesów degradacji ceramiki istotnym parametrem jest prędkość przyrostu naprężenia, która ma wpływ na generację sygnałów emisji akustycznej. Wartości deskryptorów emisji, w szczególności tempa zdarzeń, przy powolnym wzroście odkształcenia mogą być niezależne od wpływu warunków przeprowadzenia badania. Zjawisko to wynika ze zróżnicowania mechanizmów degradacji ceramiki przy różnych warunkach pomiarowych. Autor określa właściwą szybkość narastania odkształcenia na ok. 0,01 – 0,02 mm/min. Warunki takie zapewniają powstawanie i propagację pęknięć międzyfazowych i międzyziarnowych, właściwych dla eksploatacji izolatorów, zapewniając najlepsze odzwierciedlenie w eksperymencie rzeczywistych warunków starzenia ceramiki. Przy dużych prędkościach odkształcenia mogą dominować pęknięcia wewnątrz ziaren. Szybki wzrost obciążenia jest właściwy do

badan wytrzymałości doraźnej ceramiki, powolny do badań wytrzymałości długotrwałej, przy której istotną rolę odgrywają niejednorodności i zdefektowanie struktury.

W zakończeniu rozdziału autor przedstawił układ i podstawowe parametry zestawu aparatury stosowanej przez niego w badaniach mechanoakustycznych próbek ceramiki elektrotechnicznej.

W rozdziale piątym autor opisał zasady nieniszczącej metody ultradźwiękowej, którą stosował w badaniach materiałów ceramicznych. Metoda ta pełniła rolę uzupełniającą, podobnie jak metody optyczne opisane w kolejnym rozdziale, w ocenie wytrzymałości mechanicznej tworzywa ceramicznego. W oparciu o pomiary prędkości propagacji fali podłużnej i poprzecznej w kierunkach wzajemnie prostopadłych autor wyznaczał wartość modułu sprężystości Younga próbek ceramicznych. Prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej zależy też od porowatości badanego materiału, zatem możliwy był akustyczny pomiar porowatości badanych tworzyw ceramicznych. Pomiar ten wymagał jednak cechowania metody pomiarowej dla różnych tworzyw ceramicznych. Pomiary ultradźwiękowe mogą także dostarczyć informacji co do wytrzymałości elektrycznej tworzywa, która zależy od jego porowatości.

W pomiarach akustycznych wyznacza się także współczynnik tłumienia fali ultradźwiękowej w wyniku rozpraszania fali na niejednorodnościach ośrodka, na granicach międzyfazowych i międzyziarnowych, wtrąceniach, porach, mikropęknięciach i innych. By właściwie ocenić strukturę badanego materiału niezbędny był dobór częstotliwości fali ultradźwiękowej. Autor temu zagadnieniu poświęca w rozprawie wiele uwagi, analizując różne przypadki struktur ceramiki.

W rozdziale szóstym autor scharakteryzował rutynowe metody mikroskopowe stosowane w badaniach materiałów. Techniki mikroskopowe służyły weryfikacji i interpretacji wyników badań otrzymanych innymi metodami, w szczególności metodą mechanoakustyczną. Zastosowanie tych technik wymagało przygotowania próbek do badań, wykonania zglądów. Autor zwraca uwagę na warunki przygotowania próbek w taki sposób, by nie nastąpiła zmiana rzeczywistego obrazu efektów starzeniowych. Autor omówił stosowane w badaniach zasady mikroskopii optycznej w świetle odbitym, przechodzącym i spolaryzowanym oraz skaningowej mikroskopii elektronowej SEM.

Procedura badawcza w przypadku stosowania każdej z wyżej wymienionych metod mikroskopowych i ultradźwiękowych polegała na badaniu próbek ceramiki po przyłożeniu do niej obciążenia o określonej wartości, w zakresie do obciążenia niszczącego. W ten sposób można było obserwować kolejne etapy degradacji tworzywa, zmiany tekstury i morfologii, a także uzyskać informacje o składzie fazowym i chemicznym wybranych fragmentów czerepu.

W kolejnych rozdziałach – od siódmego do jedenastego autor przedstawił wyniki szczegółowych badań procesów starzeniowych w ceramikach. Wykorzystując quasi-statyczny przyrost naprężenia ściskającego, z równoczesną rejestracją sygnałów emisji akustycznej, autor wykazał możliwość symulacji w warunkach laboratoryjnych przyspieszonych procesów starzeniowych zachodzących w rzeczywistych warunkach, podczas wieloletniej eksploatacji izolatorów. Metoda badawcza była weryfikowana badaniami mikroskopowymi na przygotowanych zglądach po obciążeniu próbek różnymi wartościami naprężeń. Otrzymane obrazy mikroskopowe tekstury przełamu były porównywane z rzeczywistymi obrazami struktur ceramicznych, pochodzących z izolatorów po różnym okresie eksploatacji. Zaproponowany przez autora rozprawy sposób analizy porównawczej umożliwił wyróżnienie kolejnych etapów starzenia porcelany elektrotechnicznej. Wytrzymałość mechaniczna próbek ceramicznych (moduł Younga) określana była na podstawie pomiarów prędkości propagacji fali ultradźwiękowej poprzecznej i podłużnej w kierunku zgodnym z osią izolatora i w kierunku poprzecznym do osi. Z pomiaru amplitudowego współczynnika tłumienia fal

ultradźwiękowych autor wyciągał wnioski co do wad strukturalnych oraz jednorodności materiału ceramicznego. Badania wykonane zostały na próbkach porcelany rodzaju C 110, C 112, C 120 oraz C 130 i ceramiki korundowej C 799. Podjęcie badań tego rodzaju tworzywa ma istotne znaczenie praktyczne dla krajowej energetyki. Są to tworzywa ceramiczne, z których na przestrzeni ostatnich co najmniej 50 lat (za wyjątkiem C 130 i C 799) były wytwarzane izolatory instalowane w Polsce. W niektórych przypadkach długi okres eksploatacji tych izolatorów umożliwił zastosowanie metody porównawczej w badaniu procesów starzeniowych w warunkach laboratoryjnych, a także weryfikację eksperymentalną opracowanej przez dr Przemysława Ranachowskiego metody mechanoakustycznej. Badany był m.in. wpływ mikrostruktury ceramiki na wzmocnienie czerepu, rola fazy mulitowej w procesach starzeniowych, a także wpływ obecności ziaren kwarcu i stłuczki na obniżenie wytrzymałości ceramiki. Badania termomechaniczne w podwyższonej temperaturze (200 °C) grupy próbek pozwoliły określić wpływ temperatury na wytrzymałość ceramiki oraz na przebieg procesów relaksujących naprężenia i rozwój pęknięć w czerepie.

Wymienione kompleksowe badania stanowią oryginalne naukowe osiągnięcie autora rozprawy.

Kompleksowe badania zostały wykonane na próbkach ceramiki pobranej z izolatorów po awarii, izolatorów po określonym czasie eksploatacji, a także na próbkach izolatorów nieeksploatowanych, pochodzących z rezerwy magazynowej. Badano także próbki specjalnie przygotowane z tworzywa ceramicznego o składzie identycznym jaki był stosowany do wytworzenia izolatorów. Metoda mechanoakustyczna umożliwiła wyróżnienie wstępnego, podkrytycznego i krytycznego etapu degradacji ceramiki. Etapy te różniły się intensywnością rejestrowanych sygnałów akustycznych w poszczególnych zakresach obciążania próbki i przebiegały odmiennie w różnych rodzajach ceramiki. Wyniki badań zostały dobrze udokumentowane w rozprawie, obszernie omówione i właściwie zinterpretowane.

Badania mechanoakustyczne ceramiki C 110 wykazały, że zasadniczym źródłem procesów starzeniowych są naprężenia mechaniczne w mikroobszarach ziaren kwarcu, którego zawartość w tej ceramice wynosiła od 20 do 41 %. Szczególnie niebezpieczne są duże skupiska kwarcu, tworzące w wyniku degradacji centra poluzowanej struktury ceramicznej. Autor uważa, że może to być przyczyną obniżającą długotrwałą wytrzymałość ceramiki. Rozwój mikropeęknięć mogą inicjować także domieszki stłuczki, szczególnie przy dużej zawartości. Stłuczka zazwyczaj słabo wiąże się z szklistą matrycą. Faza mulitowa, o igłowym kształcie w strukturze ceramiki, pełni rolę elementu wzmacniającego porcelanę. Niestaranna i mało powtarzalna technologia wymieniane są wśród przyczyn obniżenia trwałości eksploatacyjnej ceramiki C 110, ocenianej przez autora na ok. 20 lat.

Badania porcelany krystobalitowej C 112 wykazały jej dużą odporność na procesy starzeniowe. Nawet próbki pobrane z izolatorów po 35 latach eksploatacji nie wykazywały obniżenia wytrzymałości mechanicznej. Jako czynniki hamujące rozwój pęknięć autor wymienia drobne ziarna krystobalitu oraz jednorodnie rozłożone w matrycy wydzielone mulitu. Znaczą awaryjność w Polsce izolatorów wykonanych z tego tworzywa przez producenta niemieckiego autor tłumaczy prawdopodobnym dostarczaniem na rynek zagraniczny izolatorów o niższej jakości, stwierdzonej podczas badań kontrolnych u producenta.

Badania procesów starzeniowych w porcelanie wysokoglinowej C 120 w izolatorach liniowych wykazały znaczne obniżenie jej wytrzymałości po długim czasie eksploatacji, trwającym 30 lat. Trwałość izolatorów liniowych szacuje na ok. 35 lat. Nasilenie procesów degradacji po 30 latach było znaczne, ale nie krytyczne. Pewne różnice między izolatorami wynikały z zawartości fazy kwarcowej. O zaawansowaniu procesów

starzeniowych decydował rodzaj obciążenia – statyczny, dynamiczny. Obciążenia izolatorów stacyjnych są nieduże i o starzeniu ceramiki decydują naprężenia wewnętrzne w fazie kwarcowej. Badania prowadzone na izolatorach wsporczych wykazały, że stopień ich degradacji po wieloletniej eksploatacji oraz nieeksploatowanych (zapasy magazynowe) jest podobny, co oznacza, że naprężenia eksploatacyjne nie mają większego wpływu na ich degradację. Opis etapów degradacji na podstawie krótkotrwałych badań mechanoakustycznych pozwolił na stwierdzenie podobieństwa efektów, jakie występują przy powolnym obciążaniu próbek i podczas długotrwałego starzenia izolatorów. Badania wykazały, że procesy degradacji są zależne od budowy fazowej czerepu i obecnych w strukturze naprężeń wewnętrznych oraz wzmocnień dyspersyjnych. Na uwagę zasługują zgodności wyników badań mechanoakustycznych specjalnie przygotowanych próbek małogabarytowych z efektami starzenia w próbkach pobranych z izolatorów po wieloletniej eksploatacji. Wyniki badań mechanoakustycznych i ultradźwiękowych autor powiązał z obserwacjami mikroskopowymi struktury ceramiki – zgładów i przełamów.

Porcelana wysokoglinowa C 130 o dużej wytrzymałości, została opracowana w latach 60. u.w., a zastosowana na większą skalę w naszym kraju w latach 90. Dzięki dużej zawartości ceramicznego tlenku glinu odznacza się dużą odpornością na procesy starzeniowe. Ceramika ta znajduje obecnie zastosowanie w produkcji izolatorów o dużej wytrzymałości i trwałości w liniach WN i NN. Brak jest doświadczeń z dłuższej eksploatacji tego typu izolatorów. Stąd badania tej ceramiki nabierają dużego znaczenia praktycznego. Na próbkach pobranych z izolatorów wykonano badania ultradźwiękowe i mechanoakustyczne. Wyniki potwierdziły w przypadku ceramiki C 130 skuteczny mechanizm blokowania mikropęknięć przez dyspersyjne i włókniste wzmocnienie matrycy. Wytrzymałość ceramiki (krótkotrwała i długotrwała) uzależniona jest od ilości, wielkości i rozłożenia drobnych ziaren korundu i igłowego mulitu w osnowie. Negatywny skutek dla wytrzymałości przynoszą zawartość sfluczki i ziarna kwarcu. Proces degradacji był trój etapowy: wstępny, podkrytyczny i krytyczny. Degradacja ziaren kwarcu rozpoczynała się od granic ziaren, następnie powstawały pęknięcia wewnętrzne. Efektem degradacji było osłabienie granic i wykruszenie korundu z obszarów aglomeratów. W zasadzie nie następowały pęknięcia mulitu. Z badań izolatora o niejednorodnej strukturze wynika, że podwyższone naprężenia w czerepie, po upływie kilkunastu lat, powodują podobne efekty jakie obserwuje się przy ścisaniu próbek w etapie podkrytycznym. Powstające pęknięcia nie przechodzą do matrycy szklisto-mulitowej. Znaczna propagacja pęknięć możliwa była dopiero w etapie krytycznym degradacji struktury ceramiki.

Tworzywo korundowe o dużej wytrzymałości mechanicznej stosowane jest do produkcji pni izolatorów hybrydowych, pracujących w trudnych warunkach środowiskowych. Celem badań tego tworzywa było poznanie budowy strukturalnej, tekstury, jednorodności, a także określenie etapów degradacji struktury. Badania mechanoakustyczne i strukturalne wykonane zostały na specjalnie wytworzonych próbkach z korundu C 799, o dużej zawartości tlenku glinu (99,7%). Próbki były prasowane pod ciśnieniem 10 MPa, dogęszczane przy ciśnieniu 120 MPa, a następnie wypalane w temperaturach 1250 °C i 1700 °C. Badania ultradźwiękowe wykazały istnienie nieznacznej anizotropii próbek, a wyznaczony na ich podstawie moduł Younga zawierał się w granicach od 364 do 373 GPa. Badania mechanoakustyczne wykazały duży rozrzut wytrzymałości próbek. W badaniach etapów degradacji stosowano deskryptor wartości skutecznej sygnału emisji akustycznej, jako że w tego typu materiale deskryptor ten był bardziej efektywny w porównaniu do tempa lub energii zdarzeń. W poszczególnych etapach degradacji tworzywa rejestrowano sygnały emisji o różnym natężeniu, niewielkim (pojedyncze) w etapie wstępnym, poniżej 2500 MPa, powyżej tego naprężenia rozpoczynał się etap podkrytyczny – pojedyncze sygnały przeplatane ciągłą aktywnością o zróżnicowanej szerokości, o średnim poziomie energii. Krytyczny etap

degradacji był krótkotrwały, w którym rejestrowano sygnały emisji akustycznej o dużej energii. Badania mikroskopowe wykazały istnienie niejednorodności struktury. Widoczne były inkluzje gazowe, niewielkie szczeliny i niejednorodności teksturalne. Porowatość była na niskim poziomie. Dla poszczególnych próbek struktury były różne, co tłumaczy stwierdzony duży rozrzut wytrzymałości próbek. W pierwszym etapie degradacji inicjowane były pęknięcia o niskiej energii w miejscach osłabionych w wyniku defektów technologicznych, wtrąceń. Charakterystyka emisji odzwierciedlała ilość, wielość i rozłożenie defektów. Podczas podkrytycznego etapu degradacji pękaniu ulegały słabsze granice międzyziarnowe. Obserwowano także wykruszenia struktury w części brzegowej, ubytki po wykruszeniach. Stan ten zależał od wytrzymałości próbki. Etap krytyczny był krótki, w zakresie kilku MPa i charakteryzował się wysoką aktywnością akustyczną. Rozrzut parametrów próbek korundowych autor obecnością niejednorodności teksturalnych, wynikających z efektu nadnaturalnego wzrostu ziaren.

W rozdziale 12 autor podsumował wyniki badań. Uzyskane wyniki badań metodą mechanoakustyczną, uzupełnione badaniami ultradźwiękowymi oraz mikroskopowymi wykazały przydatność zastosowanej metody do oceny procesów starzeniowych w ceramice elektrotechnicznej. Na podstawie badań tworzywa C 110 i C 120 można stwierdzić, że badania próbek ceramiki wykonane w laboratorium, podczas powolnego narastania naprężenia ściskającego w próbie mechanoakustycznej, w dobrym stopniu odzwierciedlają procesy degradacji występujące w warunkach rzeczywistych, podczas wieloletniej eksploatacji izolatorów. Sekwencje degradacji są podobne w obydwu przypadkach.

Dane literaturowe, jak i doświadczenia wieloletnich badań prowadzonych przez autora rozprawy wykazują, że tworzywa ceramiczne, nawet w tej samej grupie, różnią się znacznie strukturą. Ma to wpływ na zróżnicowanie właściwości mechanicznych tworzyw i przebieg procesów starzeniowych. Ważnym stwierdzeniem autora jest teza, że etap wstępnej degradacji dotyczy jedynie fazy kwarcowej i stłuczki. Elementy te są najbardziej podatne na degradację. Jedynie w przypadku tworzywa C 110 ziarna kwarcu o regularnym kształcie i wielkości od 20 do 30 μm , równomiernie rozmieszczone w czerepie, mogą pełnić rolę wzmacniającą tworzywo. Autor sformułował wniosek praktyczny, mówiący o konieczności ograniczenia zawartości stłuczki w masie tworzywa.

Na podstawie wykonanych badań tworzyw ceramicznych, autor sformułował kilka wniosków o charakterze ogólnym, które można streścić do następujących stwierdzeń:

- teoria mulitowa wzmocnienia porcelany jest słuszna w stosunku do tworzyw kwarcowych, krystobalitowych oraz wysokoglinowych. Skuteczność wzmocnienia jest tym większa, im więcej jest równomiernie rozłożonych niewielkich wydzielen mulitu wtórnego w tworzywie;
- teoria wzmocnienia matrycy przez wprowadzenie naprężeń ściskających może być słuszna tylko w przypadku porcelany kwarcowej, zawierającej ziarna kwarcu o prawidłowym kształcie, odpowiednich wymiarach i rozłożeniu;
- teoria wzmocnienia dyspersyjnego jest słuszna w przypadku wszystkich tworzyw porcelanowych, traktowanych jako kompozyty ziarniste. Stłuczka nie wzmacnia struktury;
- bardzo istotny wpływ na wytrzymałość krótko i długotrwałą ma jednorodność rozłożenia faz w osnowie szklistej oraz obecność wad technologicznych;
- pory o odpowiednim kształcie, wielkości i rozłożeniu mogą mieć pozytywny wpływ na właściwości tworzyw ceramicznych, poprzez relaksację naprężeń wewnętrznych;
- tworzywa podatne na procesy starzeniowe degradują się nawet podczas przechowywania (zapasy magazynowe) bez obciążenia.

Uwagi szczegółowe

- Praca napisana jest przejrzysto, autor stosuje konsekwentną numerację poszczególnych rozdziałów i podrozdziałów.
- Praca jest dobrze zilustrowana rysunkami, wykresami, a wyniki zestawione są w tabelach.

Uwagi krytyczne

W czasie lektury zauważyłem kilka błędów i nieścisłości, które jednak nie mają wpływu na ogólną wysoką ocenę monografii. Niektóre błędy przytaczam poniżej:

- na stronie 23 autor użył dla naprężenia jednostkę kg/cm^2 . Powinno być kG/cm^2 lub jednostka układu SI, np. N/m^2 lub MPa.
- na stronie 23 autor nieprecyzyjnie używa określenia „obciążenie” i „naprężenie”
- w wielu miejscach rozprawy autor używa terminu „ułamek Poissona”, „liczba Poissona” lub „współczynnik Poissona”. Powszechnie w literaturze używa się tego ostatniego terminu.
- na stronie 82, w objaśnieniu do wzoru 5.15, wielkość f powinna być częstotliwością fali a nie przetwornika.
- na stronie 81 i 85 autor objaśniając mechanizm tłumienia fali akustycznej w ceramice stwierdza, że „fale ultradźwiękowe mają na tyle małą długość, że nieciągłości w tworzywie znajdują wyraźne odbicie w tłumieniu ich amplitudy”. Stwierdzenie to jest słuszne, ale przy częstotliwości 1MHz długość fali jest ok. 5 mm, a przy 10 MHz wynosi ok. 0,5 mm, tymczasem defekty nieciągłości mogą być – i były znacznie mniejsze.
- na stronie 86 autor podaje, że dokładność odczytu czasu przejścia impulsu w stosowanej aparaturze wynosiła 5 ns. Czy jest to wystarczająco mało, by można precyzyjnie określić położenie wady w badanych próbkach?
- autor niewłaściwie zapisał niektóre wyniki pomiaru modułu Younga i współczynnika tłumienia, np. na str. 126. Liczba miejsc znaczących po przecinku w wyniku i niepewności nie jest taka sama.
- na stronie 222 termin „na ostro” jest raczej żargonem w określeniu sposobu wypalania ceramiki.

Wymienione wyżej uwagi o charakterze edytorskim nie mają zasadniczego wpływu na ocenę rozprawy habilitacyjnej.

Do oryginalnych elementów rozwijających teorię i technologię izolatorów ceramicznych oraz wnoszących istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej „Inżynieria materiałowa” zaliczam:

1. Opracowanie stosunkowo krótkotrwałej, mechanoakustycznej metody badań, która pozwala na dobre odzwierciedlenie procesów starzeniowych zachodzących w materiałach. Autor wykazał możliwość wykorzystania metody do badań tworzyw ceramicznych, w szczególności porcelany elektrotechnicznej różnego rodzaju.
2. Autor rozpoznał i udokumentował sekwencję najważniejszych efektów destrukcyjnych w strukturze, które towarzyszą kolejnym etapom procesu starzenia porcelan elektrotechnicznych różnego rodzaju oraz materiału korundowego.
3. Autor dokonał oceny przydatności teorii wzmocnienia porcelany dla poszczególnych rodzajów tworzyw elektrotechnicznych. Dotyczyło to teorii mulitowej, teorii strukturalnych naprężeń ściskających oraz koncepcji wzmocnienia dyspersyjnego.

Analiza ta jest szczególnie istotna w przypadku porcelan wysokoglinowych, wobec bardzo ograniczonej ilości danych w literaturze.

4. Szczegółowy opis pozytywnej lub negatywnej roli poszczególnych faz w czerepie ceramicznych tworzyw elektrotechnicznych. Stąd wynikają konkretne możliwości modyfikacji technologii wytwarzania poszczególnych materiałów. Należy dążyć do ograniczenia ilości niekorzystnych składników (kwarc, słuczka) w składzie surowej masy. Wskazane jest monitorowanie wielkości ziaren kwarcu pod kątem ewentualnego domiału składników surowej masy. Należy tak zmodyfikować skład masy i proces technologiczny, by uzyskać poprawę struktury czerepu. Przykładowo - możliwe jest ograniczenie ilości kosztownego ceramicznego tlenku glinu na korzyść poprawy jednorodności jego rozłożenia (niekorzystna obecność aglomeratów ziaren korundu). Lepsze rozdrobnienie drobin topnika skaleniowego powinno wpłynąć na ograniczenie wielkość wydzielen mulitu i poprawić ogólną jednorodność rozłożenia tej fazy w czerepie.
5. Szczegółowo opisany został wpływ wielkości, geometrii i rozłożenia porów na właściwości mechaniczne tworzyw porcelanowych.
6. Autor wykazał potrzebę monitorowania stanu tworzywa długo przechowywanych wyrobów elektrotechnicznych (tzw. rezerw magazynowych). W praktyce eksploatacyjnej brak jest świadomości procesów degradacji właściwości tworzyw z upływem czasu. Badania wykazały zaawansowany stopień procesów starzeniowych w materiale izolatorów, które przechowywane były przez co najmniej kilkanaście lat jako rezerwa stacyjna (tworzywa C 110 i C 120). Wbrew dotychczasowej opinii, nie powinny one trafić do eksploatacji.
7. Badania wykazały, wbrew powszechnym opiniom, dobrą odporność porcelany krystobalitowej (rodzaj C 112) na procesy starzeniowe.
8. Badania dały rzadką możliwość szacowania trwałości eksploatacyjnej wyrobów z poszczególnych rodzajów tworzyw.
9. Opisana sekwencja procesów niszczenia struktury w poszczególnych etapach degradacji daje możliwość oceny stanu tworzywa izolatorów zdjętych z eksploatacji. Jest to możliwe na podstawie mikroskopowych badań struktury próbek materiału, po odpowiednim przygotowaniu ich powierzchni.

Wyżej wymienione elementy są twórczym wkładem dr Przemysława Ranachowskiego w poznawczy i użytkowy charakter monografii. W mojej opinii wnoszą niezaprzeczalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej „Inżynieria materiałowa”.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa dr **Przemysława Ranachowskiego** wnosi twórcze pierwiastki w dziedzinę badań i technologii ceramiki elektrotechnicznej i stanowi oryginalny wkład w rozwój zagadnień poznawczych oraz aplikacyjnych inżynierii materiałowej.

Stawiam wniosek do Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie o dopuszczenie dr **Przemysława Ranachowskiego** do kolokwium habilitacyjnego.

2. Recenzja dorobku naukowego

Dr Przemysław Ranachowski ukończył studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. Od 1994 roku, w Pracowni Badania Struktur Materiałowych IPPT PAN, prowadził badania wykorzystania zjawiska emisji akustycznej w sonochemii – badania dynamiki procesów chemicznych i przemian fazowych w związkach nieorganicznych, a we współpracy z Wydziałem Chemicznym Politechniki Warszawskiej badał techniką ultradźwiękową fragmenty zabytkowych naczyń ceramicznych. Od 1997 roku został zatrudniony w Zakładzie Akustyki Fizycznej IPPT PAN. Od tego czasu Przemysław Ranachowski zajmuje się nieprzerwanie ceramiką elektrotechniczną. Brał udział w realizacji wielu projektów badawczych oraz ekspertyz, między innymi na rzecz Polskich Sieci Elektroenergetycznych S.A. W 2001 roku obronił pracę doktorską, wykonaną pod kierunkiem prof. Ignacego Maleckiego. Rozprawa dotyczyła wykorzystania emisji akustycznej w badaniach dynamiki reakcji chemicznych i przemian polimorficznych w związkach nieorganicznych. W kolejnych latach współpracował z oddziałem wrocławskim Instytutu Elektrotechniki, rozszerzając swoje zainteresowania na badania struktur epoksydowych rdzeni nośnych izolatorów kompozytowych oraz z Instytutem Energetyki, gdzie prowadził wspólne badania ceramiki krystalobalitowej. W latach 2002 do 2009 uczestniczył w trzech projektach badawczych, związanych tematycznie z badaniami metodami akustycznymi tworzyw ceramicznych i kompozytowych, a także niestabilności plastycznej metali oraz właściwości mechanicznych nanokrystalicznych stopów i kompozytów. Projekty te były realizowane wspólnie z Instytutem Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN w Krakowie. Opracowana przez dr Przemysława Ranachowskiego metoda mechanoakustyczna była testowana i używana w realizacji prac badawczych we współpracy z Instytutem Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, z Instytutem Energetyki w Warszawie oraz z Zakładami Porcelany Elektrotechnicznej ZAPEL S.A. w Boguchwale. Wyniki badań tworzyw ceramicznych tą metodą były przedmiotem 26 opublikowanych prac naukowych oraz zostały zebrane w monografii autora opublikowanej w Pracach IPPT 2/2011.

Dr Przemysław Ranachowski jest współautorem kilku rozdziałów w zbiorowej monografii pod redakcją prof. Z. Pohla pt. *Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce*, wydanej przez Oficynę Wydawniczą Politechniki Wrocławskiej w 2003 r. Dr Przemysław Ranachowski prowadził wspólne prace badawcze lekkich stopów magnezowych i kompozytów metalicznych w ramach współpracy trójstronnej pomiędzy IMIM PAN w Krakowie, IPPT PAN w Warszawie oraz Instytutem Materiałów i Mechaniki Maszyn Słowackiej Akademii Nauk. Współpraca ta obejmowała także wiele spotkań z naukowcami z Bratysławy.

Tematyka projektów badawczych realizowanych przy współudziale dr Przemysława Ranachowskiego wskazuje, że w sposób ciągły zajmował się zastosowaniem metod akustycznych w inżynierii materiałowej. Jego dorobek publikacyjny obejmuje łącznie 105 prac naukowych, w tym 35 opublikowanych przed doktoratem, jest autorem kilku rozdziałów w monografii dotyczącej materiałów izolacyjnych w elektroenergetyce, jest autorem samodzielnej monografii pt. *Procesy starzeniowe w ceramice elektrotechnicznej*, jest współautorem 22 ekspertyz i opracowań naukowych z zakresu materiałoznawstwa elektrotechnicznego.

Wymiernym parametrem charakteryzującym dorobek naukowy i publikacyjny dr Przemysława Ranachowskiego jest index Hirscha, wynoszący 3 wg bazy JCR ISI oraz 4 wg bazy SCOPUS (baza obejmująca większą liczbę czasopism). Liczba cytowań prac wg bazy JCR ISI wynosi 67. Jest współautorem 22 prac opublikowanych w czasopismach punktowanych z tzw. listy filadelfijskiej. Łączny Impact Factor wszystkich publikacji

wynosi 11,755 i przekracza pięciokrotną wartość mediany w dyscyplinie Material Science Ceramics (mediana 0,492; $5 \times 0,492 = 2,460$).

Większość wartościowych prac opublikowanych w czasopiśmie punktowanych z Impact Factor ukazała się w okresie ostatnich dwóch – trzech lat. Należy oczekiwać, że liczba cytowań prac habilitanta ulegnie znacznemu powiększeniu w najbliższym okresie, co spowoduje zwiększenie indexu Hirscha.

Habilitant dołączył do przesłanej dokumentacji oświadczenia współautorów o udziale w publikacjach wspólnych. Z oświadczeń wynika, że udział habilitanta jest dominujący, szczególnie w zakresie opracowania koncepcji badań, wykonania badań oraz opracowania i interpretacji wyników.

3. Inne osiągnięcia

Dr Przemysław Ranachowski jest członkiem Komitetu Technicznego Nr 303 ds. Materiałów Elektroizolacyjnych – Zespół Elektryki w PKN, jest współautorem tłumaczenia normy IEC 672-1:1995 *Ceramic and glass insulating materials*, Part 1. Jest członkiem Polskiego Towarzystwa Akustycznego, uczestniczył aktywnie w pracach Komitetu Organizacyjnego Otwartego Seminarium z Akustyki oraz uznanych sześciu konferencji zagranicznych *E-MRS Composites and Ceramic Materials – Technology, Application and Testing*. Był także wielokrotnie zapraszany do udziału w pracach Komitetu Naukowego konferencji *Napowietrzna Izolacja Wysokonapięciowa w Elektroenergetyce* (NIWE).

Za wyróżniające osiągnięcia naukowe otrzymał w latach 2002, 2004, 2005, 2007 oraz 2011 Nagrodę Dyrektora IPPT PAN.

W latach 1993-2002 był zatrudniony w Liceum Ogólnokształcącym jako nauczyciel chemii. Jego działalność dydaktyczna i zaangażowanie w pracy z młodzieżą zostało zauważone i nagrodzone nagrodą kuratora oświaty za szczególne osiągnięcia w pracy dydaktyczno-wychowawczej.

Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione osiągnięcia naukowe i ich znaczenie dla rozwoju inżynierii materiałowej stwierdzam, że **dr Przemysław Ranachowski** jest dojrzałym naukowcem i praktykiem, a jego wkład w rozwój nauki jest znaczący.

Wobec powyższego, uważam, że **dr Przemysław Ranachowski** spełnia wszystkie warunki wymagane Ustawą o stopniach i tytule naukowym, a zatem wnoszę o uznanie wymienionego dorobku jako pełne uzasadnienie wniosku o nadanie **dr Przemysławowi Ranachowskiemu** stopnia naukowego doktora habilitowanego.



prof. dr hab. inż. Marian Urbańczyk