

mgr inż. Marek Stolarski, mgr Joanna Żyłkowska

Porównanie izolatorów ceramicznych i kompozytowych w zastosowaniach kolejowych

Izolatory kompozytowe do zastosowań zewnętrznych zdobywają coraz większe uznanie w tak wymagającym środowisku, jakim jest infrastruktura transportu szynowego. Ogromny wzrost zainteresowania tymi produktami nastąpił w związku z ich zaletami sprawiającymi, że pod wieloma względami mają one znaczną przewagę nad tradycyjnie wykorzystywanymi izolatorami porcelanowymi i szklanymi. Kompozyty są lekkie, mają znacznie większą wytrzymałość mechaniczną w stosunku do wagi i wymiarów, większą odporność dielektryczną oraz lepszą charakterystykę w warunkach zanieczyszczonego środowiska i dużej wilgotności w stosunku do izolatorów ceramicznych.

Rys historyczny

Materiały izolacyjne do zastosowań zewnętrznych weszły do użytku już na przełomie XIX i XX wieku. Tradycyjnie i przez długi czas izolatory były wytwarzane z porcelany i szkła. Ponieważ materiały te mają poważne wady, od dawna trwały próby wyprodukowania izolatorów nowej generacji z innych dostępnych tworzyw. Już w latach 30. i 40. XX wieku podejmowano pierwsze próby zastąpienia materiałów nieorganicznych organicznymi. Jak to zwykle bywa – próby te nie były zbyt udane, pierwsze organiczne izolatory były produktem bardzo niedojrzałym i niepozbawionym wad. Przede wszystkim były bardzo wrażliwe na warunki atmosferyczne, a ich właściwości izolacyjne pozostawiały wiele do życzenia. W latach 50. próbowano produkcji izolatorów z żywicy epoksydowej, jednak i te próby nie dały zadowalających efektów: izolatory były ciężkie, a ich materiał ulegał degradacji pod wpływem promieniowania ultrafioletowego. W efekcie nie zostały wprowadzone na większą skalę do eksploatacji. Próby z wykorzystaniem kompozytów zaczęły się w latach 60., a w latach 70. zostały opracowane nowe materiały izolacyjne oraz powstała całościowa koncepcja struktury takiego izolatora: rdzeń z tworzywa sztucznego wzmocnione-

go włóknem szklanym, odporny na siły ciągnące, warstwa zewnętrzna z kauczuku etylenowo-propylenowego, łączenia przy pomocy terpolimeru etylenowo-propylenowo-dienowego (EPDM), politetrafluoroetylen (PTFE), kauczuku silikonowego (SIR) lub podobnych materiałów. Ponieważ technologia była wciąż nowa, wiele detali konstrukcyjnych wymagało dopracowania. Poprawiano łączenie materiałów, przewodzenie wilgoci czy konstrukcje okuć końcowych, które przenoszą obciążenia mechaniczne. Od lat 80. wzrósł stopień wykorzystania kauczuku silikonowego ze względu na jego odporność na warunki atmosferyczne i doskonałe właściwości hydrofobowe, dające wysoką niezawodność eksploatacji w zanieczyszczonym środowisku. Od tego momentu znaczenie izolatorów kompozytowych gwałtownie wzrosło.

Od lat 90. izolatory kompozytowe można uznać za w pełni dojrzały produkt. Ponieważ jednak wciąż pamięta się o niepowodzeniach pierwszych prób z izolatorami z materiałów organicznych, rynek podchodzi do tej grupy produktów z pewną nieufnością. Nadal wykonawcom robót elektrycznych zdarza się zrezygnować z zakupu izolatorów kompozytowych, powołując się na wady ich protoplastów.

Wraz z dopracowywaniem technologii produkcji, stopniowo obniżała się cena kompozytów. Początkowo ich wadą była wyższa cena niż tradycyjnych izolatorów, jednak obecnie izolatory kompozytowe stają się tańsze niż ich szklane i porcelanowe odpowiedniki.

Zalety izolatorów kompozytowych

Tradycyjne izolatory wytwarza się ze szkła lub porcelany, które mają doskonałe właściwości izolacyjne i charakteryzują się dużą odpornością na warunki atmosferyczne. Jednocześnie materiały te są ciężkie, podatne na uszkodzenia mechaniczne (kruchłość), a ich właściwości izolacyjne słabną przy zanieczyszczeniu powierzchni. Wady tradycyjnych izolatorów spowodowały zapotrzebowanie na rozwój izolatorów o innej strukturze, z nowych materiałów, o lepszych właściwościach izolacyjnych i mechanicznych.

Izolatory kompozytowe, określane też jako polimerowe, mają liczne zalety w porównaniu z izolatorami porcelanowymi i szklanymi. Ich niewielka masa umożliwia tworzenie różnych układów łańcuchów izolatorów oraz wież z izolatorów podporowych, niemożliwych w przypadku izolatorów z tradycyjnych materiałów. Przy tym

wytrzymałość dielektryczna kształtuje się na poziomie co najmniej równym ich porcelanowym odpowiednikom.

Szczególne korzyści ze stosowania izolatorów kompozytowych w porównaniu z ceramicznymi:

- Niewielka masa – niższe koszty instalacji i transportu
- Większa odporność na wandalizm
- Duża wytrzymałość mechaniczna w stosunku do wagi – możliwe dłuższe przęsła sieci
- Lepsza izolacyjność przy zanieczyszczeniach powierzchni izolatora
- Poprawa estetyki linii przesyłowej
- Skalowalność konstrukcji – możliwość obniżenia ceny

Izolatory kompozytowe nie są narażone na działanie dużych prądów upływowych, gdyż niezależnie od ilości zanieczyszczeń w atmosferze kauczuk silikonowy (SIR) ma stałe właściwości hydrofobowe prowadzące do skraplania (perlenia) i odprowadzania wody oraz zanieczyszczeń. Takie samooczyszczanie powierzchni ma miejsce nawet przy dużej ilości zanieczyszczeń w powietrzu. Zapewnia to mniejsze straty na linii przesyłowej oraz stałe wartości przeskoku w całym cyklu życia izolatora. Te niezwykle cechy upływności warstwy silikonowej pozwalają na zmniejszenie w przypadku SIR drogi upływu o 30% względem równoważnej drogi upływu dla porcelany lub szkła. Aby potwierdzić wyższość SIR w tym względzie, przeprowadzono testy laboratoryjne i terenowe izolatorów kompozytowych i ich porcelanowych i szklanych odpowiedników (m.in. Alan Bradwell, Wielka Brytania, badania w ramach testów dla Kolei Brytyjskich). Wykazano o 30% mniejszy upływ w porównaniu do tradycyjnych izolatorów porcelanowych pracujących przy napięciu 25 kV. Przy najwyższym poziomie zanieczyszczeń izolator kompozytowy wykazał napięcie przeskoku na poziomie o 30% wyższym niż porcelanowy.

Korzyści ekonomiczne:

- niższe koszty produkcji, transportu, załadunku, składowania i instalacji ze względu na mniejszą masę i wymiary niż izolatorów szklanych i porcelanowych
- brak uszkodzeń podczas transportu (w przypadku ceramiki i szkła 2-5% produktów ulega uszkodzeniom jeszcze przed montażem)
- brak kosztów konserwacji - wykazano 30 lat eksploatacji na sieci kolejowej
- możliwe wyższe koszty diagnostyki w przypadku uszkodzeń kompozytu – do wykrycia uszkodzenia konieczna kamera termowizyjna

Tabela 1. Podstawowe różnice między izolatorami ceramicznymi i kompozytowymi.

| Ceramika | Kompozyty |
|---|---|
| Wykonane z materiałów nieorganicznych | Wykonane z materiałów organicznych |
| 90 lat doświadczenia | 35 lat doświadczenia |
| Stosunkowo niska precyzja wykonania | Wysoka precyzja i dokładność wykonania |
| Duży ciężar | Niski ciężar, łatwość montażu i demontażu |
| Ograniczony zakres kształtu izolatora Duże odstępy izolacyjne z uwagi na upływność | Mniejsze wymiary, nie rzucające się w oczy profile, mniejsze odstępy izolacyjne |
| Może być pokrywany i myty | Może być myty (pokrycie w strukturze własnej) |
| Niska hydrofobowość | Wysoka hydrofobowość |
| Niska wytrzymałość mechaniczna | Wysoka wytrzymałość mechaniczna |
| Mała odporność na udary Pęknięte fragmenty niebezpieczne dla ludzi | Brak zagrożenia dla zdrowia |
| | Lepsza izolacyjność przy zanieczyszczonej powierzchni izolatora |
| Energochłonność produkcji | Niższa energochłonność przy masowej produkcji |

Izolatory z kompozytów znajdują zastosowanie na trakcji na całym świecie. Do zastosowań trakcyjnych projektuje się izolatory kompozytowe w taki sposób, aby mogły bezpośrednio zastąpić izolatory porcelanowe, co znacznie ułatwia wymianę technologii. Również w przypadku urządzeń pokładowych, takich jak izolatory podstawy pantografu, izolatory kompozytowe są zaprojektowane tak, aby bezpośrednio zastąpić izolatory porcelanowe. Ponieważ mają one dużą odporność na udary, stanowią jednocześnie dobre zabezpieczenie przed skutkami złamania pantografu, zmniejszając ryzyko wystąpienia takiego zjawiska. Przy zastosowaniu izolatorów porcelanowych, które się łamią, ryzyko zerwania pantografu z dachu pojazdu jest dużo większe, a co za tym idzie także zwiększa się prawdopodobieństwo spowodowania dalszych strat na drodze uszkodzonego w ten sposób pojazdu.

Izolatory kompozytowe są tak projektowane, by zapewnić efektywne kosztowo rozwiązania zarówno do zastosowań standardowych, jak i nietypowych. Różnorodność dostępnych wzorów z ich wytrzymałościami pozwala na wybór najlepszego izolatora dla danej aplikacji.

Budowa i projektowanie izolatorów kompozytowych

Konstrukcja izolatorów kompozytowych jest oparta na rdzeniach wyciskanych w procesie pultruzji, wykonanych z włókna szklanego wzmocnionego żywicą. Powinny one być maksymalnie odporne na obciążenia mechaniczne, ponieważ to one są elementem nośnym izolatora i na nie przenoszone są obciążenia. Wytrzymałość izolatora zależy bezpośrednio od wytrzymałości jego rdzenia, w związku z czym producenci



Fot.1. Izolator kompozytowy ukośnika rurowego



Fot.2. Izolator kompozytowy odciągowy

wybierają takie materiały i procesy technologiczne, które zapewnią jak największą wytrzymałość mechaniczną w warunkach dynamicznego obciążenia. Każdy materiał na rdzeń musi spełnić rygorystyczne normy jakości dla wytrzymałości dielektrycznej, zawartości szkła oraz absorpcji wilgoci, co zapewnia ich długi okres użytkowania.

W celu ochrony rdzenia przed wpływem warunków środowiskowych oraz w celu zwiększenia wytrzymałości napięciowej układu, jest on pokryty kauczukiem silikonowym (SIR), a okucia końcowe są przyłączone na obu końcach za pomocą specjalnego procesu zaciskania. W produkcji stosuje się także wiele spoiw, uszczelniaczy, jak również wykorzystuje się takie technologie, jak obróbka strumieniowo-ścierna rdzenia, aby zwiększyć jego wytrzymałość i umożliwić jak najlepsze połączenie z okuciami końcowymi. W aplikacjach naciągowych stosuje się pręty epoksydowo-szklane, zaś pręty z włókna szklanego typu E (standardowe właściwości mechaniczne, niższa cena) lub ECR (włókna o wysokiej odporności na korozję i niskiej stałej dielektrycznej, droższe) mają zastosowanie w pozostałych aplikacjach.

Zasady projektowania izolatorów dla trakcji AC i DC

Izolatory kompozytowe mają lepsze właściwości (odporność na przebicie) w porównaniu ze szklanymi i porcelanowymi przy

określonej wartości napięcia prądu stałego. Przy tym napięcie stałe powoduje większe osiadanie zanieczyszczeń na powierzchni izolatora niż napięcie przemienne. Aby przezwyciężyć to zjawisko, projektując izolatory prądu stałego należy zwiększyć długość drogi upływu na większą, niż wynika to z normy IEC 6815.

W środowisku mocno zanieczyszczonym norma IEC 6815 zaleca upływ ponad 30mm na kV. Dla zastosowań DC, nawet przy niskich napięciach, jak 3kV DC, projektuje się ponad 40mm na kV. Korzystnie jest, gdy można zaprojektować zamiennie dłuższe i krótsze profile osłon, przy czym muszą być one tak ustawione, aby umożliwić zmywanie zanieczyszczeń. Gdy izolator jest ustawiony pionowo, górna powierzchnia osłony powinna być nachylna pod kątem co najmniej 15°, a mała osłona powinna mieć długość o około połowę mniejszą niż duża, aby zapewnić odpowiedni – nie kaskadowy – przepływ wody.

Drugą ważną kwestią w projektowaniu izolatorów kompozytowych jest grubość warstwy SIR pokrywającej rdzeń izolatora. Przy napięciu przemiennym grubość ta może być nieznacznie mniejsza niż przy stałym. Dla prądu stałego projektuje się grubość minimum 3 mm, a często 3,5 mm. Uzasadnieniem jest wyższy poziom zanieczyszczeń zbierających się na powierzchni.

Warunki środowiskowe

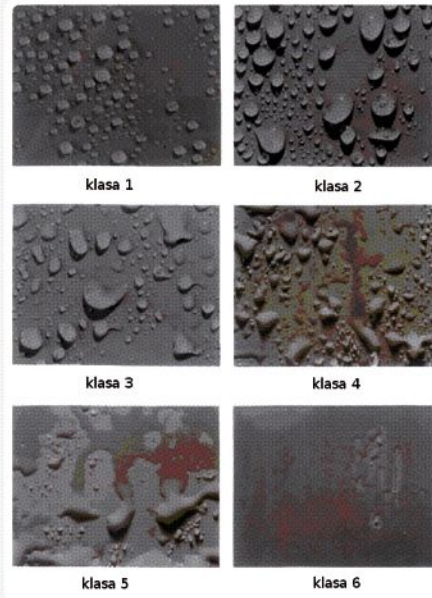
Warunki środowiskowe znacznie różnią się w zależności od lokalizacji geograficznej danej inwestycji. Dużą rolę odgrywają takie czynniki, jak bliskość zakładów przemysłowych, wybrzeży morskich itp., a także to czy inwestycja przebiega w tunelu. Przy projektowaniu izolatorów kompozytowych dla konkretnego zastosowania należy wziąć te czynniki pod uwagę, jak również w uzasadnionych przypadkach także lokalne warunki pogodowe (dobowe zakresy temperatur, rodzaj i ilość opadów itp.).

Hydrofobowość izolatorów polimerowych

Hydrofobowością materiału nazywamy jego odporność na przepływ wody, nasiąkanie wodą lub tworzenie się warstwy wody na jego powierzchni. Hydrofobowość można określić przez kąt zwilżania, czyli kąt, jaki się tworzy pomiędzy powierzchnią materiału a cieczą (wodą), która się z nim styka. W materiałach hydrofobowych kąt zwilżania wynosi powyżej 90°, w hydrofilowych jest mniejszy od kąta prostego. Materiały hydrofilowe są łatwo zwilżalne – umożliwiają wodzie przyleganie do nich na dużej powierzchni. Materiał hydrofobowy „nie lubi” wody, powoduje jej perlenie

– tworzenie kropli zamiast powierzchni pokrytych warstwą wody – a co za tym idzie, woda styka się z nimi na dużo mniejszej powierzchni i nie tworzy ciągłych płaszczyzn.

Większa hydrofobowość izolatorów polimerowych zapewnia większą wydajność przy pracy w zanieczyszczonym środowisku. Sześciostopniową skalę od pełnej hydrofobowości do kompletnego hydrofilowego spływu wody przedstawia zdjęcie poniżej.

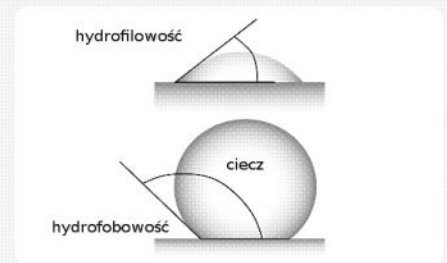


Fot. 3. Klasyfikacja hydrofobowości materiału w skali sześciostopniowej

Według tej skali powierzchnia izolatora może mieć hydrofobowość od 1 do 3, natomiast zwilżanie (hydrofilowość) na poziomie 4-6 jest niedopuszczalne. Zamoczona powierzchnia nie może mieć fragmentów pokrytych warstwą wody. Hydrofilowość sprawia, że powierzchnie są mokre, co prowadzi do powstawania strumieni wody, a co za tym idzie większego obciążenia elektrycznego i przebieg oraz erozji powierzchni przy dodatkowej obecności zanieczyszczeń.

Efekt zwilżania materiału hydrofilowego powoduje, że w zanieczyszczonym środowisku na powierzchni izolatora tworzą się ścieżki erozji, gdy na powierzchni izolatora powstaje napięcie elektryczne. Zjawisko to nasila się z czasem, ostatecznie prowadząc do przebiecia erozji przez całą warstwę wierzchnią izolatora aż do jego rdzenia – w tym przypadku izolator ostatecznie przestaje być zdalny do użytku. Dlatego tak ważne jest dbanie o odpowiedni poziom hydrofobowości izolatora.

Na stopień hydrofobowości wpływ ma m.in. proces produkcji. Wykorzystanie technologii HTV (wulkanizacji w wysokiej temperaturze) wzmacnia efekt hydrofobowości, zaś izolatory wykonane w technologii RTV (wulkanizacji w temperaturze pokojowej) i LSR (technologia płynnego silikonu) cechuje mniejsza hydrofobowość.



Fot. 4. Efekt perlenia na powierzchniach hydrofobowych.

Bibliografia:

1. Barsch, S.J., **Design evaluation of silicone rubber Insulators with surface pollution stress**, Ljubljana, Slovenia, 2007.
2. Da Silva E., **Reliability of composite insulators**, w: "Technical meeting on Optimisation of Overhead Line Infrastructure", Supergen – AMPeRS, Manchester, UK, 2008.
3. Gubanski S.M., Fernando M.A.R.M., **Ageing of Silicone Rubber Insulators in Coastal and Inland Tropical Environment**, „IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation”, 2010, nr. 17, nr 2, s. 326-333.
4. Gubanski S. M., Vlasatos A. E., **Wettability of naturally aged silicone and EPDM composite insulators**, „IEEE Trans. on Power Del.", 1990, nr 5, s.1527-1535.
5. IEC 60507 Ed 2. **Artificial pollution tests on high voltage insulators at AC voltages.**
6. IEC 60587 Ed 1. **Test methods for evaluating resistance to tracking and erosion.**



Marek Stolarski

Absolwent Wydziału Maszyn Roboczych i Pojazdów Politechniki Warszawskiej ze specjalnością sterowanie ruchem kolejowym. Pracował m.in. w służbie automatyki PKP oraz w Centralnym Ośrodku Badań i Rozwoju Techniki Kolejnictwa (obecnym Instytucie Kolejnictwa). Wieloletni koordynator międzynarodowych tematów badawczych RWPG. Od 1993 roku prezes Przedsiębiorstwa Wdrożeniowo-Produkcyjnego „NEEL” Sp. z o.o. w Warszawie.



Joanna Żyłkowska

Absolwentka Międzywydziałowych Studiów Ochrony Środowiska na Uniwersytecie Warszawskim. Interesuje się ochroną przyrody, w szczególności ochroną zwierząt, a także zoopsychologią. Od 2007 roku związana z Przedsiębiorstwem Wdrożeniowo-Produkcyjnym „NEEL” w Warszawie. Od tego czasu zajmuje się głównie problemem kolizji zwierząt z pociągami, ich przyczynami i sposobami zapobiegania.