

Janusz Fleszyński¹, Jerzy Ranachowski², Przemysław Ranachowski²

STRUKTURALNE I ULTRADŹWIĘKOWE BADANIA PRĘTÓW NOŚNYCH IZOLATORÓW KOMPOZYTOWYCH

Streszczenie: W pracy opisano badania strukturalne próbek prętów nośnych izolatorów kompozytowych trzech rodzajów. Badania mikroskopowe obejmowały oględziny zglądów powierzchni przekroju prętów oraz ocenę budowy strukturalnej tworzywa szkło-epoksydowego pod kątem analizy wielkości i rozkładu włókien rovingu oraz porów. Opisano również brzegowe warstwy prętów SE. Próbki poddano badaniom ultradźwiękowym w celu stwierdzenia przydatności techniki akustycznej do oceny tworzyw prętów SE różnego pochodzenia. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów prędkości oraz tłumienia ultradźwiękowych fal podłużnych stwierdzono pełną przydatność metody do badań tworzywa prętów nośnych izolatorów kompozytowych. Badania strukturalne, obok kompleksowego uwidocznienia cech budowy tworzyw, pozwoliły również na ocenę procesu technologicznego obróbki preimpregnatu.

Słowa kluczowe: izolator kompozytowy, mikroskopowa analiza strukturalna, badania ultradźwiękowe.

1. Wstęp

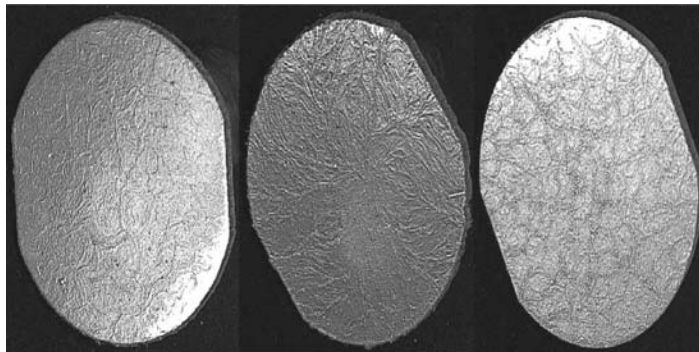
Badania przeprowadzono na 12 próbkach wyciętych z prętów nośnych izolatorów kompozytowych linii WN różnego pochodzenia. Próbki oznaczone 1, koloru zielonkawego, wycięte zostały z pręta produkcji krajowej. Wykonano je wg starszej technologii ciśnieniowej owijania. Próbki oznaczone 2, koloru beżowego, również pochodziły z pręta produkcji krajowej, lecz wykonanego nowszą technologią formowania metodą ciągłą. Próbki oznaczone 3, koloru brązowego, wycięte z pręta znanego zagranicznego producenta, wytworzone zostały także metodą ciągłą [1]. Wymiary wszystkich próbek wynosiły około 30 mm długości i 20 mm średnicy. Połowa z nich oznaczona dodatkowo literami c oraz d poddana została długotrwałej próbie nasiąkliwości wodnej. Pozostałe próbki, oznaczone literami a oraz b, nie były przed badaniami moczone w wodzie. Analiza mikroskopowa obejmowała ocenę zglądów powierzchni przekroju prętów oraz ich warstw brzegowych, w powiększeniu do 500 razy. W ramach badań ultradźwiękowych wykonano pomiary prędkości propagacji oraz tłumienia podłużnych fal ultradźwiękowych wzdłuż oraz w poprzek osi wzdłużnej prętów SE.

¹ Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

² Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, ul. Świętokrzyska 21, 00-049 Warszawa

2. Badania strukturalne

Do badań strukturalnych odcięto z próbek każdej grupy płaskorównoległe plastry o grubości około 7 mm. Ich powierzchnie poddane zostały klasycznemu procesowi szlifowania, polerowania oraz płukania w chemicznie aktywnych detergentach i suszenia [2]. Badania przeprowadzono wykorzystując mikroskop optyczny (MO) sprzężony z komputerowym analizatorem obrazu kanadyjskiej firmy Clemex. Obserwacji powierzchni zglądów, przedstawionych na rysunku 1, dokonano w kilkakrotnym powiększeniu.



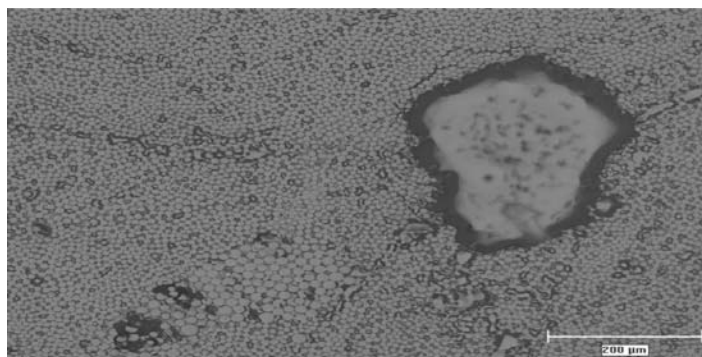
Rys. 1. Obraz zglądu przekroju poprzecznego pręta SE z grupy oznaczonej 1 - z lewej, 2 - w środku oraz 3 - z prawej strony. Powiększenie około 2 razy

Przykładowy zgląd przekroju pręta z grupy próbek ozn. 1 obrazuje drobny, lecz wyraźny relief obszarów wypływu syciwa epoksydowego. Jego silnie rozgałęziony i nierównomierny charakter wskazuje na niejednorodności strukturalne. W przypadku zglądów przekroju pręta z grupy ozn. 2, również widoczny jest wyraźny i rozgałęziony relief nasilający się w kierunku brzegów pręta. Obraz ten sugeruje występowanie gradientu temperatury w trakcie obróbki termicznej preimpregnatu. Widoczny na zglądach próbek z grupy ozn. 3 relief ma regularny, ziarnisty charakter, równomiernie rozłożony na całej powierzchni. Wskazuje to na prawidłowy, stabilny proces obróbki termicznej preimpregnatu, pozwalający na wytworzenie jednorodnej tekstury w obrębie całego pręta

Mikrostruktura badanych tworzyw SE obserwowana była pod mikroskopem optycznym w powiększeniu 50,500 razy. Na rysunku 2 przedstawiono przykład obrazu strukturalnego próbki z grupy ozn. 1. Widoczny jest tu charakterystyczny, duży por z występującymi pęknięciami obrzeżnymi, drobne obszary wypływu syciwa epoksydowego bez rovingu oraz obszar zawierający włókna szklane o wyraźnie większej średnicy. Typowe włókna w tworzywie ozn. 1 mają średnią wielkość $6,3 \pm 1,2 \mu\text{m}$ i zawierają się w przedziale od 3,0 do $10,8 \mu\text{m}$. Niemniej, w wydzielonych enklawach, znajdują się również grubsze włókna o szerokim, sięgającym $25 \mu\text{m}$, rozkładzie wartości średnic. Ich średnia wielkość wynosi $9,4 \pm 4,4 \mu\text{m}$. Zaznaczyć też należy, że jedynie nieliczne z włókien posiadają wzdłużne pęknięcia. Zawartość inkluzji gazowych w tworzywie SE ozn. 1 wynosi 13,4%. Pory jednak najczęściej są małe, ich średnia wielkość wynosi $9,7 \pm 4,5 \mu\text{m}$.

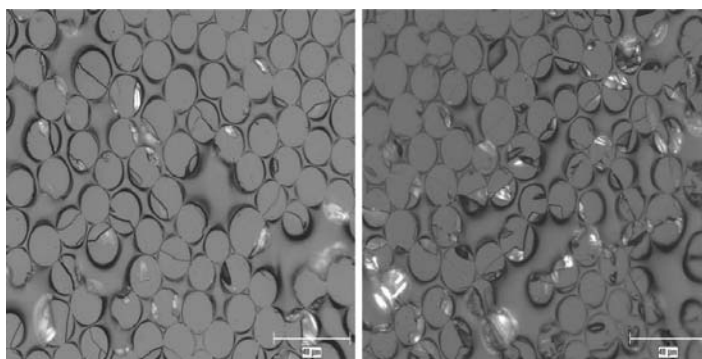
Obrazy mikroskopowe tworzywa z grupy ozn. 2 ukazują znacznie mniejszą gęstość rozkładu włókien i związane z tym liczne reliefy wypływu syciwa bez rovingu. Włókna mają

wyraźnie większą średnicę niż w przypadku tworzywa ozn. 1. Ich średnia wielkość wynosi $11,2 \pm 4,0 \mu\text{m}$, przy czym rozkład wartości średnic nie jest szeroki – 90% obiektów mieści się w zakresie $6, 16 \mu\text{m}$. Podkreślić jednak należy, że wiele z włókien wykazuje charakterystyczne, wzdłużne pęknięcia, wyraźnie widoczne na rysunku 3. Zawartość inkluzji gazowych w tworzywie ozn. 2 wynosi 7,3 %. Pory, choć rozmieszczone dosyć rzadko, mają najczęściej duże rozmiary. Ich średnia wielkość wynosi aż $110 \pm 37 \mu\text{m}$. Są zatem o rząd wielkości większe niż w przypadku inkluzji w próbkach oznaczonych 1.



Rys. 2. *Obraz mikrostruktury tworzywa ozn. 1 w powiększeniu 50 razy. Zwraca uwagę duży por, pęknięcie obrzeżne oraz obszary zawierające włókna rovingu o większej średnicy*

W próbkach prętów ozn. 3 obecności porów nie stwierdzono w ogóle. Relief obszarów pozbawionych rovingu jest dosyć drobny i mało wyraźny. Całościowo, strukturę określić można jako dosyć jednorodną – znacznie bardziej niż w przypadku tworzyw ozn. 1 i 2. Ponadto zastosowana żywica oznacza się wysoką twardością, dorównującą włóknom rovingu. Ujawniło się to podczas przygotowywania złądów do badań mikroskopowych. Stwierdzić jednak należy, że włókna wykazują znaczne zróżnicowanie średnic. Z powodu ich silnego splekania wzdłużnego, widocznego wyraźnie na rysunku 3, precyzyjna rejestracja rozkładu wielkości średnic nie była możliwa. Określono jedynie wartość średnią - $16,2 \mu\text{m}$ i przybliżoną szerokość rozkładu – od około 9 do $25 \mu\text{m}$. W porównaniu do tworzyw oznaczonych 1 i 2 włókna rovingu są zatem znacząco większe i mają szerszy rozkład wielkości.



Rys. 3. *Obraz mikrostruktury tworzywa ozn. 2 - z lewej oraz 3 - z prawej strony w powiększeniu 200 razy. Widoczne jest silne wzdłużne splekanie włókien szklanych rovingu*

Przedmiotem dodatkowych badań mikroskopowych była ocena zewnętrznych warstw badanych próbek SE prętów nośnych. Stwierdzono, iż w przypadku próbek ozn. 1 i 2 występuje znaczne rozmielenie warstw brzegowych, szczególnie jednak duże w prętach z grupy 1. Ponadto obecne są również liczne spękania. W przypadku tworzywa ozn. 1 sięgają one przeszło 500 μm od brzegu pręta i mają średnią długość 4,7 cm na bieżący cm obwodu. W próbkach ozn. 2 głębokość ich sięga ponad 200 μm , a średnia długość 2,3 cm na cm obwodu. Próbkę prętów ozn. 3 nie wykazują rozmielenia powierzchni ani spękań. Stwierdzono natomiast występowanie utwardzonej warstwy brzegowej, o wysokiej gładkości i dobrym związaniu z matrycą.

3. Pomiary ultradźwiękowe

Badania akustyczne wykonane zostały na specjalnej aparaturze, zaprojektowanej i wykonanej w IPPT PAN. Konstrukcja układu, opisana została szczegółowo w pracy [3], natomiast zakres zastosowań między innymi na sympozjum EUI '99 [4]. Pomiary prędkości propagacji oraz tłumienia ultradźwiękowych fal podłużnych przeprowadzone zostały impulsową metodą echa z wykorzystaniem głowicy nadawczo–odbiorczej o częstotliwości pracy 4,7 MHz. Badania prędkości rozchodzenia się fal podłużnych c_L wykonano wzdłuż osi pręta, na dopolerowanych płaskorównolegle powierzchniach czołowych oraz w poprzek osi, z wykorzystaniem specjalnie zeszlifowanych płaszczyzn na powierzchniach tworzących, widocznych na rysunku 1. Obliczona dokładność graniczna pomiarów, wynikająca głównie z rodzaju tworzywa i długości drogi impulsów, wynosiła ± 50 m/s wzdłuż i ± 60 m/s prostopadłe do osi próbek. Prędkość c_L obliczano dzieląc długość drogi (2l) przez odczytany na ekranie oscyloskopu czas przejścia fali odbitej od przeciwległej powierzchni. Uśrednione w obrębie każdej próbki prędkości c_L zestawiono w tabelicy 1.

Tabela 1. Prędkość propagacji ultradźwiękowych fal podłużnych c_L [m/s] mierzona równolegle i prostopadłe do osi próbek

Ozn. próbki	$c_L \parallel$	$c_L \perp$	Ozn. próbki	$c_L \parallel$	$c_L \perp$	Ozn. próbki	$c_L \parallel$	$c_L \perp$
1a	5350	3600	2a	4960	3230	3a	4830	3140
1b	5260	3490	2b	5000	3250	3b	4630	3010
1c	5220	3530	2c	5090	3310	3c	4760	3090
1d	5280	3520	2d	5090	3360	3d	4690	3050

Na podstawie pomiarów wartości c_L stwierdzić można ogólnie dobrą jednorodność tworzywa w obrębie poszczególnych grup oraz brak wpływu wilgoci (próbki c oraz d po długotrwałej próbie nasiąkliwości) - wynikający głównie z nieobecności otwartej porowatości. W szeregu tworzyw 1 ÷ 3 prędkość c_L wyraźnie maleje, mimo coraz bardziej jednorodnej struktury i malejącej zawartości inkluzji gazowych. Tendencja ta wynika najprawdopodobniej z rosnącego znacząco stopnia wzdłużnego spękania włókien szklanych rovingu. Może to być konsekwencją temperatur stosowanych do termicznej obróbki preimpregnatu.

Pomiary tłumienia wykonano równolegle do osi wzdłużnej prętów, przykładając głowicę w trzech punktach czołowej powierzchni próbek. Położenia oznaczone A oraz C umiejscowione były przy bocznej krawędzi, natomiast B w środku - na osi próbki. Mierzony był amplitudowy współczynnik tłumienia α podłużnej fali ultradźwiękowej, traktowanej jako fala sprężysta naprężeń lub ciśnień. Naprężenie fali może być w funkcji drogi opisane zależnością:

$$A = A_0 e^{-\alpha l} \quad (1)$$

gdzie A oznacza amplitudę w odległości l wyrażonej w cm, natomiast A_0 oznacza początkową amplitudę fali sprężystej przy $l = 0$ [5]. Sam pomiar polegał na wyznaczeniu amplitudy pierwszego odbicia A_1 oraz drugiego odbicia A_2 . Miał zatem charakter względny – niezależny od siły docisku głowicy do badanej próbki. Współczynnik tłumienia α , wyrażony w dB/cm obliczono z zależności:

$$\alpha = (20 \log A_2 / A_1) / 2l \quad (2)$$

gdzie l oznacza odległość między płaskorównoległymi powierzchniami czołowymi. Wyniki pomiarów próbek ozn. 1a,b; 2a,b oraz 3a,b zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Wartości współczynnika tłumienia α w dB/cm mierzone wzdłuż osi próbek 1a,b; 2a,b; 3a,b

1a	A 2,99	2a	A 1,35	3a	A 3,08
	B 3,29		B 3,02		B 3,79
	C 2,50		C 2,02		C 2,78
1b	A 3,13	2b	A 3,87	3b	A 3,63
	B 4,75		B 4,67		B 4,34
	C 3,82		C 3,52		C 4,38

W przypadku wszystkich badanych próbek stwierdzono, iż najwyższe tłumienie występuje w środku - na wzdłużnej osi prętów SE. Świadczy to o tym, że na współczynnik tłumienia decydujący wpływ ma efekt rozpraszania, natomiast tzw. czynniki klasyczne jak tarcie wewnętrzne i przewodnictwo cieplne odgrywają mniejszą rolę. Mechanizm tłumienia w tworzywach kompozytowych ma ogólnie bardzo złożony charakter. Do takich też materiałów zaliczyć można szkło-epoksydowe pręty nośne izolatorów. Wynikają stąd znaczące różnice wartości współczynnika α , nawet w obrębie tych samych próbek. Dodatkowy, poważny wpływ na tłumienie mogą mieć również przypuszczalne skręcenia włókien rovingu. Niemniej wnioskować można, iż ogólnie rosnące tłumienie w szeregu tworzyw 1 ÷ 3 spowodowane jest, podobnie jak malejąca wartość prędkości c_L , spękaniami włókien szklanych rovingu. Jak dowiodły badania strukturalne, w tworzywie ozn. 1 spękania są stosunkowo nieliczne, w próbkach ozn. 2 popękana była większość włókien, natomiast w materiale SE ozn. 3 niemal wszystkie włókna posiadały silne spękania. Mierzone prostopadłe do osi próbek wartości współczynnika tłumienia α potwierdziły stwierdzone zależności. W przypadku próbek 1a i 1b wyniosły odpowiednio -3,80 i -5,71; natomiast dla próbek 2a i 2b odpowiednio -8,46 i -6,81. Analogiczny pomiar próbek 3a oraz 3b okazał się niemożliwy z uwagi na zbyt wysokie tłumienie fal ultradźwiękowych.

4. Podsumowanie

Niezależnie od wnikliwej analizy strukturalnej, celem pracy było ustalenie możliwości ultradźwiękowych badań jakości wykonania nośnych prętów SE izolatorów kompozytowych. Wykonane serie pomiarów pozwalają na stwierdzenie, iż metoda ultradźwiękowa daje możliwość wyraźnego rozróżnienia tworzyw SE pochodzących z różnych grup izolatorów. Wyniki badań akustycznych potwierdziły stwierdzony metodami akustycznymi stopień zdefektowania włókien rovingu przy jednoczesnej dobrej jednorodności tworzywa w obrębie grup 1, 2 i 3. Potwierdzono także brak wpływu długotrwałej próby nasiąkliwości wodnej na strukturę tworzyw. Niemniej dla ustalenia metodyki ultradźwiękowych badań prętów nośnych izolatorów kompozytowych konieczne jest przeprowadzenie szeregu dalszych pomiarów na szerszej grupie tworzyw SE.

Literatura

- [1] **Stankiewicz J.:** *Izolatory kompozytowe - przegląd konstrukcji i technologii*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej z okazji 55-lecia ZPE ZAPEL Ceramika Elektrotechniczna – wytwarzanie, eksploatacja, rozwój. Boguchwała 1994, uzupełnienie.
- [2] **Kingery W.D., Bowen H.K., Uhlmann D.R.:** *Introduction to Ceramics, Second Edition*. John Wiley & Sons, Inc., New York · London 1976, chapter 9.
- [3] **Ranachowski J., Ranachowski P., Bertrand J.:** *Aparatura akustyczna do oceny jakości, niezawodności i prognozowania trwałości ceramicznych izolatorów elektroenergetycznych*. Materiały VI Ogólnopolskiej konferencji naukowo – techniczna NIWE 2000. Wrocław 2000, s.101-116.
- [4] **Ranachowski J., Ranachowski P.:** *Metody akustyczne w badaniach ceramicznych izolatorów energetycznych*. Materiały VII Sympozjum Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia EUI '99. Zakopane – Kraków 1999, s.361-368.
- [5] **Śliwiński A.:** *Ultradźwięki i ich zastosowanie*. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993, rozdział 4.

THE STRUCTURAL AND ULTRASONIC EXAMINATION OF CARRYING RODS OF COMPOSITE INSULATORS

The work is devoted to the structural testing of fibreglass reinforced polymer (FRP) carrying rods of composite insulators. Detailed microscope observations were complemented by velocity and attenuation measurements of ultrasonic longitudinal waves. The examination confirmed usefulness of acoustic method in quality and homogeneity testing of FRP carrying rods of composite insulators.